

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



“Influencia de la temperatura de impregnación del azufre sobre carbón activado de **Persea american** en la adsorción de plomo hierro y cadmio en soluciones acuosas.”

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

Autor: Br. Viera Moreno, Norberto Alonzo.

Asesor: Dr. Cruz Monzón, José Alfredo.

Trujillo – Perú

2019

DEDICATORIA

A DIOS...

*Por darme el conocimiento y la fortaleza
en cada paso de mi formación
profesional.*

A MIS PADRES...

*A mi madre Jilma; por su amor, apoyo
incondicional en todo momento, por ser
uno de mis ejemplos a seguir, ejemplo de
constancia y lucha por la realización de
los sueños. A la memoria de mi padre
Norberto quien me brindo los primeros
conocimientos en la vida.*

A mis hermanos

*Karina, Nick, Ingrid, Paola y Sheyla
por estar siempre presentes en mi vida.*

A mis amigos...

*A los que están, los que estuvieron y a
los que vendrán, que pasaron por
nuestras vidas aportando un granito de
arena para nuestro conocimiento*

Norberto Alonzo

JURADO

.....
DR. WILSON REYES LÁZARO

PRESIDENTE

.....
DR. MIGUEL MONTREUIL FRIAS

SECRETARIO

.....
DR. JOSÉ ALFREDO CRUZ MONZÓN

ASESOR

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecer a Dios por permitirme sonreír ante mis logros que son el resultado de su ayuda.

Agradezco a la Universidad Nacional de Trujillo por haberme permitido ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar.

A la facultad de Ingeniería Química y los docentes que forman parte de ella por compartir sus conocimientos y su apoyo para seguir día a día.

A mi asesor, el Dr. José Alfredo Cruz Monzón, por orientarme y seguir compartiendo sus conocimientos en todo este proceso.

Al técnico Jesús Mora Tandaypan por su apoyo en los momentos más cruciales, por las facilidades que nos brindó para desarrollar parte del proyecto en el laboratorio de Química General de la facultad de Ingeniería Química y así mismo a la escuela de Ingeniería Ambiental por apoyarme en la parte final del proyecto en el uso de sus laboratorios.

A mi madre Jilma y a mis hermanos Karina, Nick, Ingrid, Paola, Sheyla por su constante apoyo, por el sacrificio que desde muy joven emprendimos para ser alguien en la vida.

Y por último a mis amigos, Jorman, Abel, Daniel, Fernando, Luis, Ana Claudia, Luz, muchas gracias por todo el apoyo.

El autor

ÍNDICE

Dedicatoria	i
Jurado	ii
Agradecimiento	iii
Índice	iv
Listado de figuras	vi
Listado de tablas	vii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Realidad problemática	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Marco Teórico	5
1.3.1 Metales pesados	5
1.3.2 Metales pesados y el medio ambiental	6
1.3.3 El azufre y sus aplicaciones	10
1.3.4 Carbón activado	11
1.3.4.1 Conceptos de carbón activado	13
1.3.4.2 Características fisicoquímicas	13
A) Composición química	13
B) Estructura física	14
1.3.5 Proceso de activación	15
A) Activación física	15
B) Activación química	16
1.3.6 Proceso de adsorción	17
1.3.6.1 Isoterma de adsorción	17
a) Isoterma de Freundlich	19
b) Isoterma de Langmuir	20
1.3.7 Aplicaciones de carbón activado	20
1.3.8 Precursor	21
A) Persea americana (palta)	21
B) Producción mundial	22
C) Posicionamiento en el mundo	22
1.4 Problema	23

1.5	Hipótesis	23
1.6	Justificación	23
1.7	Objetivos	23
1.7.1	Objetivo general	23
1.7.2	Objetivos específicos	24
II.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1	Equipos, instrumentos y reactivos	25
2.1.1	Equipos	25
2.1.2	Instrumentos	26
2.1.3	Reactivos	26
2.2	Métodos	27
2.2.1	Modelo	27
2.2.2	Variables y niveles	27
2.2.3	Matriz de diseño	27
2.2.4	Procedimiento experimental	28
III.	RESULTADOS	31
3.1	Parámetros controlados en la etapa de carbonización	31
3.2	Influencia de la temperatura de impregnación del azufre sobre carbón activado	38
IV.	DISCUSIÓN	46
V.	CONCLUSIONES	48
VI.	RECOMENDACIONES	49
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
VIII.	ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.	Contaminante de mayor preocupación para la salud publica OMS, 2010.	7
Figura 2.	Representación de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse en un carbón.	14
Figura 3.	Esquema del tamaño de poro en un carbón activado.	14
Figura 4.	Comportamiento de los 6 tipos de isotermas.	19
Figura 5.	Diagrama de bloques del procedimiento experimental.	30
Figura 6.	Absorbancia en función de la concentración de AM.	32
Figura 7.	Rendimiento en función de la masa del carbón (300°C).	33
Figura 8.	Rendimiento en función de la masa del carbón (350°C).	34
Figura 9.	Rendimiento en función de la masa del carbón (400°C).	35
Figura 10.	Rendimiento en función de la masa del carbón (450°C).	36
Figura 11.	Rendimiento en función de la masa del carbón (500°C).	37
Figura 12.	Rendimiento en función de la Temperatura.	38
Figura 13.	Remoción de plomo en función de la Temperatura.	39
Figura 14.	Remoción entre el CA y CA impregnado en una solución de plomo.	40
Figura 15.	Remoción de hierro en función de la temperatura.	41
Figura 16.	Remoción entre el CA y CA impregnado en una solución de hierro.	42
Figura 17.	Remoción Cadmio en función de la temperatura.	43
Figura 18.	Remoción entre el CA y CA impregnado en una solución de cadmio.	44
Figura 19.	Tiempo de agitación Vs $\text{Log}(Q_e - Q_t)$.	66
Figura 20.	Tiempo de agitación vs t/Q_t .	67
Figura 21.	Determinado la conductividad en la muestra.	68
Figura 22.	Muestras en estufa para el secado.	69
Figura 23.	Muestras listas para la carbonización.	69
Figura 24.	Determinación de la humedad en la materia prima.	70
Figura 25.	Resultados en la determinación de humedad.	70
Figura 26.	Muestras de azul de metileno.	71
Figura 27.	Muestras de soluciones de metales en agitación.	71

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Lista de equipos empleados.	25
Tabla 2.	Lista de instrumentos empleados.	26
Tabla 3.	Lista de reactivos empleados.	26
Tabla 4.	Factores y niveles del diseño experimental.	27
Tabla 5.	Matriz de diseño experimental para las concentraciones finales.	28
Tabla 6.	Absorbancia y concentración para la curva de calibrado.	31
Tabla 7.	Rendimiento de CA (300 °C) sobre azul de metileno.	32
Tabla 8.	Rendimiento de CA (350 °C) sobre azul de metileno.	33
Tabla 9.	Rendimiento de CA (400 °C) sobre azul de metileno.	34
Tabla 10.	Rendimiento de CA (450 °C) sobre azul de metileno.	35
Tabla 11.	Rendimiento de CA (500 °C) sobre azul de metileno.	36
Tabla 12.	Rendimiento de CA a diferentes temperaturas.	37
Tabla 13.	Remoción de plomo en CA impregnado a diferentes temperaturas.	39
Tabla 14.	Comparación de remoción de plomo entre los carbones.	40
Tabla 15.	Remoción de hierro en CA impregnado a diferentes temperaturas.	41
Tabla 16.	Comparación de remoción de hierro entre los carbones.	42
Tabla 17.	Remoción de cadmio en CA impregnado a diferentes temperaturas.	43
Tabla 18.	Comparación de remoción de hierro entre los carbones.	44
Tabla 19.	Análisis de datos en SPSS para el plomo.	45
Tabla 20.	Análisis de datos en SPSS para el hierro.	45
Tabla 21.	Análisis de datos en SPSS para el cadmio.	45
Tabla 22.	Volúmenes teóricos para la recta de calibración.	57
Tabla 23.	Datos de concentración reales de azul de metileno.	58
Tabla 24.	Datos de concentración de AM (ppm) con absorbancia.	58
Tabla 25.	Datos de la primera carbonización.	60
Tabla 26.	Datos en la segunda carbonización.	60
Tabla 27.	Datos en la tercera carbonización.	61
Tabla 28.	Valores en la determinación de humedad en la muestra.	61

Tabla 29.	Cálculo del modelo de Pseudo primer orden.	65
Tabla 30.	Cálculo del modelo de Pseudo segundo orden.	67

Biblioteca de Ingeniería Química

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo estudiar el efecto que tiene la temperatura de impregnación del azufre sobre el carbón activado (CA) producido a partir de la pepa de *Persea americana* “palta”, para adsorber Pb^{+2} , Fe^{+2} y Cd^{+2} presentes en soluciones acuosas preparadas en los estándares de plomo, hierro y cadmio.

Se elaboró carbón activado a base de la pepa de palta, usando como agente activante ácido fosfórico (H_3PO_4 85%), se obtuvo 5 carbones, carbonizados desde 300°C hasta 500°C con intervalo de 50°C. Para evaluar el grado de adsorción del carbón activado se usó soluciones de azul de metileno (AM) de 100 ppm, con volúmenes de 100 ml a diferentes masas de carbón desde 0.5 g hasta 1.3 g en intervalos de 0.2 g y puesto en agitación a 180 rpm por 6 horas; en esta etapa se determinó que la masa optima a usar fue de 0.5 g y obtenida a 450°C, siendo la eficiencia máxima alcanzada de 19,1776 mg AM/ g CA.

En etapa de impregnación se usó el carbón más eficiente de 450°C y masa de azufre y carbón en la misma cantidad, se mezcló y se llevó a carbonización desde 300°C hasta 500°C en intervalos de temperatura de 50°C durante 2 horas, al finalizar se aplicó este carbón activado impregnado sobre soluciones de 3 metales de plomo, hierro y cadmio de 100 ppm y con volúmenes de 100 ml, en un tiempo de agitación de 2 horas a 180 rpm, se filtró y se procedió a lectura en un equipo de absorción atómica; se determinó que el carbón activado impregnado con mayor eficiencia fue para plomo y a una temperatura de impregnación de 400°C, alcanzando una mayor remoción 0.1345 mg Pb^{+2} /g $CA_{impregnado} \cdot \text{min.}$, seguido del cadmio con una remoción de 0.0375 mg Cd^{2+} /g $CA_{impregnado} \cdot \text{min}$ y por último el hierro con una remoción de 0,0257 mg Fe^{2+} /g $CA_{impregnado} \cdot \text{min.}$

Palabras claves: *impregnación, carbón activado, adsorción, carbonización, remoción.*

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effect of sulfur impregnation temperature on activated carbon (CA) produced from the Persea americana "avocado" pebble, to adsorb Pb^{+2} , Fe^{+2} and Cd^{+2} present in aqueous solutions prepared in the lead, iron and cadmium standards.

Activated charcoal was elaborated using the avocado peel, using as phosphoric acid activating agent (H_3PO_4 85%), 5 carbons were obtained, charred from 300°C to 500°C with an interval of 50°C . To evaluate the degree of adsorption of the activated carbon solutions of methylene blue (AM) of 100 ppm were used, with volumes of 100 ml at different carbon masses from 0.5 g to 1.3 g in 0.2 g intervals and stirred at 180 rpm. for 6 hours; In this stage it was determined that the optimum mass to be used was 0.5 g and obtained at 450°C , with the maximum efficiency reached of 19.1776 mg AM / g CA.

In the impregnation stage, the most efficient coal of 450°C and mass of sulfur and coal in the same amount was used, mixed and carbonized from 300°C to 500°C in temperature intervals of 50°C for 2 hours. At the end, this impregnated activated carbon was applied on solutions of 3 metals of lead, iron and cadmium of 100 ppm and with volumes of 100 ml, at a stirring time of 2 hours at 180 rpm, it was filtered and read in an atomic absorption equipment; it was determined that the impregnated activated carbon with greater efficiency was for lead and at an impregnation temperature of 400°C , reaching a greater removal $0.1345 \text{ mg Pb}^{+2}/\text{g CA}_{\text{impregnated}} \cdot \text{min}$, followed by cadmium with a removal of $0.0375 \text{ mg Cd}^{2+}/\text{g CA}_{\text{impregnated}} \cdot \text{min}$ and finally the iron with a removal of $0.0257 \text{ mg Fe}^{2+}/\text{g CA}_{\text{impregnated}} \cdot \text{min}$.

Keywords: *impregnation, activated carbon, adsorption, carbonization, removal.*

I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Realidad problemática.

La temática del deterioro ambiental es una de las problemáticas que más atención centra entre las inquietudes que afectan a la humanidad en la actualidad. Desde las conversaciones habituales del ciudadano común hasta los debates entre versados expertos en este campo del conocimiento, la situación del ambiente es objeto de puntos de vista, enfoques y marcos teóricos en diversas regiones del planeta.

La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividades agrícolas se ha incrementado exponencialmente. La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. En septiembre de 2015, la Asamblea general de la ONU, acordó como objetivo: “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, otorgándole al agua un carácter prioritario para todos los países miembro ¹.

El 27 de septiembre de 2016 en Ginebra la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha elaborado un nuevo modelo de calidad del aire que confirma que el 92% de la población mundial vive en lugares donde los niveles de calidad del aire exceden los límites fijados por la OMS. En 2012, según las estimaciones, 6,5 millones de muertes (11,6% de todas las muertes mundiales) estuvieron relacionadas con la contaminación del aire tanto de interiores como de exteriores ².

A lo largo del tiempo, debido a la actividad humana, el medio ambiente se ha visto afectado de manera dramática, tal es el caso en Kabwe – Zambia donde la población potencialmente afectada se calcula en 250 000 personas, la cual ha registrado concentraciones en sangre de niños de 200 o más microgramos/decilitro (concentración de plomo) ³, la mina OK Tedi, situada en la provincia de Western de Papua Nueva Guinea ha tenido efectos devastantes para 50 000 personas, los bancos de pesca se han reducido entre el 70 y 90 %, unos 1300 km² de vegetación han muerto, y las concentraciones de cobre en el agua son unas treinta veces superiores a los niveles del suelo⁴, el desastre de Bhopal, ocurrido en 1984 y es constituida como la mayor catástrofe de la historia, se originó al producirse una fuga de Isocianato de Metilo a la atmósfera; lo cual ocasiono más de 20000 muertes durante y después de la fuga y producir enfermedades crónicas respiratorias, afecciones oculares, daños del sistema inmunológico, casos de cáncer entre otros, en por lo menos 120 000 personas, y los productos tóxicos abandonados en el lugar aún siguen contaminado las aguas subterráneas ⁵, y así se puede detallar muchos como el derrame del golfo de México ⁶, el desastre ecológico de barrio

“Love Canal” en las cataratas del Niagara ⁷, el derrame de petróleo del buque Exxon Valdez en Alaska ⁸, entre mucho se puede observar que a pesar del tiempo el medio ambiente aún sigue siendo afectado y en muchos casos no se aplican las medidas para la remediación del mismo.

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) y actividades de la vida diaria, causando efectos adversos en el hombre, animales y vegetales; problemática a la que el Perú no es ajeno, entre los principales agentes contaminantes identificados en nuestro país por la actividad minera tenemos el plomo, mercurio, aluminio, arsénico, cadmio, magnesio, manganeso, hierro, cobre, cianuro, agregándose a estos metales pesados el dióxido de azufre, y el ácido sulfúrico ⁹.

Una de las fuentes de mayor contaminación es el agua, ya que en ella se depositan los vertederos de las fábricas, drenajes domésticos, relaves de minerías, etc. En nuestra ciudad una de las fuentes que es afectada por los relaves mineros es el río Moche, fuente para los regadíos y consumo doméstico de los centros poblados desde Otuzco, Julcán, Simbal, Agallpampa, Quiruvilca, Motil entre otros; es por ellos que los metales que se encuentran en el afluente en mayor concentración son el plomo, hierro y cadmio (94%, 51%, y 100%, respectivamente), los cuales sobrepasan los límites máximos permisibles propuestos por la ley general de aguas para abastecimiento doméstico ¹⁰.

Los metales pesados como el plomo es una sustancia tóxica que se va acumulando en el organismo afectando a diversos sistemas, con efectos especialmente dañinos en los niños de corta edad; el cual se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones, huesos y dientes, donde se va acumulando con el paso del tiempo, en personas gestantes el plomo presente en los huesos es liberado hacia la sangre durante el embarazo y se convierte en una fuente de exposición para el feto¹¹; metales como el hierro afectan directamente a los vasos, corazón e hígado, el cual es muy sensible a la intoxicación con este metal, las alteraciones neurológicas se deben a la toxicidad sistémica y al edema cerebral inducido directamente por el hierro¹²; de igual manera el cadmio tiene efectos severos en la salud, ya que una vez que pasa al torrente sanguíneo, entre el 90 y 95% se fija a la hemoglobina, para luego ser transportado hacia el pulmón, riñón e hígado, donde se almacena entre el 50 al 75%, donde se acumulará casi de manera definitiva; en la intoxicación muy avanzada aparece daño renal con hipercalcemia, llegando a producir osteomalacia, en forma

de fisuras óseas simétricas que aparecen sobre todo en el cuello del fémur, afectando especialmente a las mujeres, después de la menopausia, provocando dolores violentos en pelvis y miembros inferiores, explicando así el nombre con el que se conoce esta enfermedad en Japón "Itai-Itai"¹³.

En la actualidad se busca encontrar alternativas novedosas y que sean amables con el medio ambiente las cuales ayuden a aplacar la contaminación, ya sea, degradación del suelo¹⁴, contaminación del aire¹⁵ o del agua¹⁶.

El carbón activado es el adsorbente más versátil¹⁷ y comúnmente usado debido a su alta área superficial y volumen de poro, alta capacidad de adsorción, con cinética rápida, y relativamente fácil regeneración, se trata de un grupo de materiales preparados mediante reacción de un material carbonizado con gases oxidantes o mediante la carbonización de un material lignocelulósico impregnado con agentes químicos deshidratantes¹⁸. Su preparación a base de materia prima que ya no es utilizable como, cascara de coco¹⁹, cascara de almendra²⁰, cascara de castaña²¹, cascara de frejol²², residuos de piña²³, entre otros materiales no convencionales dan un valor agregado al carbón activado ya que de una manera u otra se contribuyendo a solucionar el problema de la contaminación.

1.2 Antecedentes.

En el 2010, Hernández ²⁴ evaluó la remoción de carbono orgánico, sulfuros y nitrógeno amoniacal presentes en las aguas amargas en un proceso de desorción mediante el uso de un sistema de carbón activado en donde se afirmó que, la operación en continuo del sistema de carbón activado asistido biológicamente permitió la remoción de contaminantes hasta de un 84% de materia oxidable (DQO), 67% de remoción de COD, 100% de sulfuros y 60% en la remoción de nitrógeno amoniacal, logrando así un sistema en donde se puede tratar un agua compleja como el agua desflemada ²⁴.

Paredes, en el 2011²⁵ estudiaron la adsorción de compuestos aromáticos como el fenol, ácido benzoico y ácido salicílico usando carbón activado obtenido de la cascara de castaña, al final del proyecto se logró sintetizar carbones activados por activación química de cáscara de castaña obteniéndose materiales con micro y meso porosidad y, con áreas superficiales entre 1176 - 1434 m²/g. Al incrementar la razón de impregnación y la temperatura de activación en los carbones preparados, aumentó su grado de porosidad confirmado por el análisis morfológico SEM; así como también, se determinó que la capacidad

de adsorción de estos compuestos presenta el siguiente orden descendente: Ácido salicílico > ácido benzoico > fenol, también, se concluyó que el fenol se adsorbe más rápido que el resto teniendo un tiempo de equilibrio promedio de 4 horas ²⁵.

Solís, Morales, Ayala y Durán, en el 2012 ²⁶ evaluaron la remoción de color del jugo de caña con carbón activado en donde, las pruebas preliminares realizadas con el empleo del CA de bagazo de caña se alcanzó un porcentaje del 98% de remoción de color en el guarapo y un 77% en el jugo claro, indicando que las mayores capacidades ²⁶.

En el 2012, Martínez ²⁷, estudiaron el desarrollo carbones activados en base a cascara de almendra para recuperar tolueno y n-hexano en corrientes de gas con baja concentración, al final del proyecto se pudieron desarrollar carbones activados a partir de cáscara de almendra en condiciones experimentales definidas mediante un diseño experimental que utiliza como parámetros de entrada la temperatura de activación, el ratio de impregnación y el tiempo de activación. Todo ello aporta una metodología para la preparación de carbones activados a partir de cáscara de almendra perfectamente reproducible ²⁷.

Carbajal ²⁸, en el 2014 en su investigación busco mejorar el área superficial de carbones activados y aumentar el volumen de poro del mismo usando diferentes compuestos, al finalizar pudo determinar que la impregnación de carbones activados tanto granulares como pelletizados, favorece la adsorción de 2,4-DNF de acuerdo con el siguiente orden: $H_3PO_4 > HNO_3 > ZnCl_2$ y la adsorción de fenol en el orden de $ZnCl_2 > HNO_3 > H_3PO_4$; esto indica que la impregnación de los carbones activados con los modificadores empleados a temperatura de 18°C cambia la química de la superficie de los carbones mejorando la interacción del adsorbato con los grupos de oxígeno presentes en la superficie ²⁸.

Omenat ²⁹, en el 2016, en su investigación tuvo como objetivo optimizar la preparación de carbón activado a partir de kemaf usando como agente activante aire y CO_2 , posterior a ello se modificó la superficie con ácido nítrico y ácido sulfúrico para mejorar el área superficial, al finalizar se concluyó que el tratamiento con ácidos minerales puede dar lugar a cambios importantes en la estructura porosa de los carbones de kenaf, pero apenas modifica la de los carbones comerciales ²⁹.

Salas ³⁰, en el 2016, en su investigación sobre bioremediación de suelos y tratamiento de lixiviados con carbón activado logró concluir mediante el uso de un diseño de experimentos factorial, permitió identificar la influencia de los factores experimentales sobre las

características finales de los CA de esta especie (bambú), determinando que los factores más influyentes sobre las características finales de los CA fueron: Temperatura de activación, Tiempo de activación y agente activante. En comparación con NaOH, el H_3PO_4 favorece a una mayor área superficial, además de mayor cantidad de lactonas y grupos carboxilos. El área superficial y en consecuencia el volumen de poros aumenta con el tiempo de activación. Otro hecho importante es que el uso de dos etapas durante el proceso de activación (carbonización - activación) se obtuvo valores de área superficial similares a los reportados en la literatura. La micrografía permitió corroborar el efecto de la activación sobre morfología del bambú ³⁰.

Grisales y Rojas en el 2016 ³¹, estudiaron la obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y la aplicaron en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales; para ello utilizaron como agente activante NaOH, H_2SO_4 y H_3PO_4 , siendo el NaOH y el H_3PO_4 , los que presentaron mayores capacidades de adsorción para el colorante marino Bh. En el caso de NaOH al 20 % se encontró un porcentaje de adsorción del 77,9 %, para el H_3PO_4 40%, el porcentaje de adsorción fue del 94,1 % y para el H_3PO_4 al 20% el porcentaje de adsorción fue del 87,4% ³¹.

En el 2016 Alvarado y Alvarado³², modificaron la estructura del área del carbón activado impregnándose azufre a diferentes temperaturas para mejorar la remoción de Hg^{2+} ; se logró determinar que la temperatura de impregnación influye en la adsorción de Hg^{2+} , mostrándose así la gran capacidad de remoción que tiene este tipo de carbón impregnado con azufre en donde la impregnación del azufre se dio de manera adecuada a una temperatura de 500°C, en la cual se dio una máxima capacidad de adsorción del mercurio ³².

1.3 Marco teórico.

1.3.1 Metales pesados.

Según la tabla periódica, es un elemento químico con alta densidad (mayor a 4 g/cm³), masa y peso atómico por encima de 20, y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu), estaño (Sn), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn) ³³.

El plomo, cobre, plata y oro fueron los metales utilizados por primera vez por los humanos antiguos, los egipcios utilizaron probablemente ya en 5000 A.C. La simplicidad de la reducción de los minerales, el bajo punto de fusión y la facilidad de fabricación presumiblemente condujeron a su uso. El plomo también fue ampliamente utilizado por los griegos y los romanos; los segmentos de las columnas acanaladas, comunes en la arquitectura griega, están unidos por varillas de hierro colocadas en cavidades que se llenaban con plomo fundido. Se han encontrado tuberías de plomo en las ruinas de Roma y Pompeya, confirmando el uso del plomo en la antigüedad, algunos tubos de este período todavía funcionan en Gran Bretaña ³⁴.

El plomo, es un producto esencial en el mundo industrial moderno, en el 2016 tuvo una tasa de crecimiento de producción de +2.3% y contaba con una reserva que sumaron los 88 millones de TM; en cuanto al precio tuvo un aumento de 6.1% con respecto al año anterior (1891 US\$/TM). Un poco más de la mitad del plomo producido en el mundo ahora proviene de fuentes recicladas ³⁵.

El hierro constituye cerca del 1,51% en peso de la corteza terrestre. Es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad, aunque muy raramente se encuentra libre en la naturaleza, la facilidad con que sus óxidos son reducidos por el carbón y la abundancia de los mismos en la superficie terrestre, hicieron posible su descubrimiento y aplicaciones a la fabricación de utensilios y armas.

El hierro se encuentra en numerosos minerales y mineraloides, magnetita (Fe_3O_4), hemetita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), siderita (FeCO_3), pirita (FeS_2), etc. ³⁶. Fue descubierto en 1817 por Strohmeyer de Gottingen como una impureza en el carbonato de zinc. La abundancia en la corteza de cadmio está entre 0.1 y 0.5 ppm, y se han identificado varios minerales de cadmio, el más común es Greenockita, CdS . El cadmio generalmente se encuentra en minerales de zinc, minerales de plomo que contienen zinc o minerales complejos de cobre, plomo y zinc, sin embargo, donde forma un isomorfo es en la esfalerita mineral de zinc, ZnS usualmente en una concentración de 0.1-0.5% de cadmio. Por esta razón, el cadmio se recupera casi invariablemente como un subproducto del procesamiento de zinc y minerales de cobre ³⁷.

1.3.2 Metales pesados y el medio ambiente.

A nivel global y local se identifica un creciente problema de contaminación por metales pesados, que compromete severamente la salud, seguridad alimentaria y medio

ambiente, según una publicación por la organización mundial de la salud metales como el plomo, cadmio, mercurio y arsénico entre otras sustancias que constituyen una preocupación para la salud pública por ser muy peligrosas y pueden incidir negativamente en nuestra salud y en el medio ambiente cuando no se administran de forma adecuada ³⁸.

No todos los metales de densidad alta son especialmente tóxicos en concentraciones normales (algunos de ellos son necesarios para el ser humano). No obstante, hay una serie de metales pesados más conocidos por su tendencia a representar serios problemas medioambientales, el mercurio (Hg) ^{39, 40}, el plomo (Pb) ⁴¹, el cadmio (Cd) ⁴² y el talio (Tl) ⁴³, así como el cobre (Cu) ⁴⁴, zinc (Zn) ⁴⁵ y cromo (Cr) ⁴⁶. En ocasiones se incluye al hablar de contaminación por metales pesados a otros elementos tóxicos ligeros como el berilio (Be) ⁴⁷ o el aluminio (Al) ⁴⁸, o algún semimetal como el arsénico (As)⁴⁹.

La peligrosidad de los metales pesados reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse (que significa que se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanzan en los alimentos o medioambiente, y que estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica), provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter. En el ser humano se han detectado infinidad de efectos físicos (dolores crónicos, problemas sanguíneos, etc.) y efectos psíquicos (ansiedad, pasividad, etc.) ⁵⁰.



Figura 1. 10 contaminante de mayor preocupación para la salud publica OMS, 2010

Fuente. Organización Mundial de la Salud⁵¹.

La organización mundial de la salud logro considerar 10 contaminantes que son de mayor preocupación para la salud pública, son sustancias químicas, que son parte de nuestra vida diaria, son muy peligrosas y pueden incidir negativamente en nuestra salud y en el medio ambiente cuando no se administran de forma adecuada.

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Entre las principales fuentes de contaminación ambiental destacan la explotación minera, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje y, en algunos países, el uso persistente de pinturas y gasolinas con plomo. Más de tres cuartas partes del consumo mundial de plomo corresponden a la fabricación de baterías de plomo-ácido para vehículos de motor. Sin embargo, este metal también se utiliza en muchos otros productos, como pigmentos, pinturas, material de soldadura, vidrieras, vajillas de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, artículos de joyería y juguetes, así como en algunos productos cosméticos y medicamentos tradicionales. También puede contener plomo el agua potable canalizada a través de tuberías de plomo o con soldadura a base de este metal. En la actualidad, buena parte del plomo comercializado en los mercados mundiales se obtiene por medio del reciclaje.

En cuanto a la salud en los niños de corta edad son especialmente vulnerables a los efectos tóxicos del plomo, que puede tener consecuencias graves y permanentes en su salud, afectando en particular al desarrollo del cerebro y del sistema nervioso. El plomo también causa daños duraderos en los adultos, por ejemplo, aumentando el riesgo de hipertensión arterial y de lesiones renales. En las embarazadas, la exposición a concentraciones elevadas de plomo puede ser causa de aborto natural, muerte fetal, parto prematuro y bajo peso al nacer, y provocar malformaciones leves en el feto ⁵¹.

Un estudio realizado en los Estados Unidos sobre los efectos del plomo podría ser uno de los factores más importantes que influyen en el crimen violento en los Estados Unidos, este efecto el crimen puede ser solo la punta del iceberg. Los aumentos de la impulsividad, la agresividad y el TDAH (Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad) pueden afectar muchas otras conductas, como el abuso de sustancias, el suicidio, el embarazo adolescente, el bajo rendimiento académico, el bajo rendimiento en el mercado laboral y el divorcio ⁵².

La OMS estima que 143,000 muertes por año son el resultado de envenenamiento por plomo, y la pintura con plomo es un contribuyente importante. La exposición también contribuye a 600,000 nuevos casos de niños con discapacidades intelectuales cada año, y la gran mayoría (99 por ciento) de los niños afectados por la alta exposición al plomo viven en países de bajos y medianos ingresos ⁵³.

El hierro, este metal tiene propiedades peligrosas cuando se asocian a compuestos formados con este se deben por lo general al radical con que está asociado el hierro. Así, el arsenato (FeAsO_4) y el arsenito férrico ($\text{FeAsO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) poseen las propiedades venenosas de los compuestos arsenicales. El hierro carbonilo (FeCO_5) es uno de los carbonilos metálicos más peligrosos, con propiedades tóxicas ⁵⁴.

La inhalación de polvo que contenga óxido de hierro o sílice puede originar neumoconiosis, pero no existen conclusiones definitivas con relación al papel de las partículas de óxido de hierro en el desarrollo del cáncer de pulmón en el hombre. Los experimentos en animales indican que el polvo de óxido de hierro podría actuar como una sustancia “co-cancerígena”, favoreciendo el desarrollo del cáncer cuando se combina simultáneamente con la exposición a sustancias cancerígenas.

En una publicación por el departamento de química de la Universidad de Sevilla sobre contaminación de suelos por metales pesados, menciona que los óxidos e hidróxidos de hierro y también de manganeso juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo, quedando con esto los metales pesados acumulados en los primeros centímetros del suelo ⁵⁵.

El hierro, metal que se encuentra en la corteza terrestre, asociado con minerales de cinc, plomo y cobre; es liberado al suelo, al agua y al aire durante la extracción y refinación de metales no ferrosos, la manufactura y aplicación de abonos de fosfato, la combustión de combustibles fósiles, y la disposición e incineración de basura ⁵⁶.

Para la OMS el cadmio tiene efectos tóxicos en los riñones y en los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno para los seres humano ⁵⁷. El Cadmio tiene efectos severos en la salud, ya que una vez que pasa al torrente sanguíneo, entre el 90-95% se fija a la hemoglobina, para luego ser transportado hacia el pulmón, riñón e hígado, donde se almacena entre el 50 al 75%, donde se acumulará casi de

manera definitiva; en la intoxicación muy avanzada aparece daño renal con hipercalcemia, llegando a producir osteomalacia, en forma de fisuras óseas simétricas que aparecen sobretodo en el cuello del fémur, afectando especialmente a las mujeres, después de la menopausia, provocando dolores violentos en pelvis y miembros inferiores, explicando así el nombre con el que se conoce esta enfermedad en Japón “Itai-Itai”¹³. Tiene una larga vida media biológica en humanos de 10-35 años.

Existe evidencia de que el cadmio es carcinogénico por la vía de inhalación, y la IARC (Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer) ha clasificado los compuestos de cadmio en el Grupo 2A (probablemente cancerígenos para los humanos). Sin embargo, no hay evidencia de carcinogenicidad por vía oral y no hay pruebas claras de la genotoxicidad del cadmio ⁵⁸.

La Agencia de Protección Ambiental designó el cadmio entre las 188 sustancias, conocidas por tener efectos nocivos a la salud, como *Hazardous Air Pollutants (HAP)*, contaminantes peligrosos del aire⁵⁹.

1.3.3 El azufre y sus aplicaciones.

El azufre y sus compuestos ocupan un lugar preeminente entre los productos químicos fundamentales para la industria química, tanto inorgánica como orgánica. Conocido desde la antigüedad, se lo menciona en la Biblia y en varios papiros egipcios donde se le adjudicaba propiedades medicinales.

El azufre desempeña también un importante papel en las concepciones teóricas de los alquimistas puesto que en aquella época fue considerado como un exponente perfecto de uno de los principios básicos de la Naturaleza: la combustibilidad. Los alquimistas creían que el azufre poseía al mismo tiempo la propiedad enigmática de producir nuevas sustancias al arder, por lo que se lo consideraba como el componente que faltaba para la piedra filosofal, que tan infructuosamente trataban de hallar para poder obtener oro artificial. Fue Lavoisier quien, en 1778, estableció que el azufre es un elemento; los compuestos del azufre son más abundantes que la sustancia simple. Estos se clasifican en dos grandes grupos: sulfuros y sulfatos. Los sulfuros son compuestos binarios de los elementos con el azufre. Los sulfuros minerales más importantes son la galena, PbS, la blenda, ZnS, las piritas de cobre o calcopiritas FeCuS₂, el cinabrio, HgS, la estibina Sb₂S₃,

y la pirita FeS_2 . Entre los sulfatos naturales, los más importantes son el yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la celestina, SrSO_4 y la baritina BaSO_4 ⁶⁰.

El azufre se usa en multitud de procesos industriales, como la producción de ácido sulfúrico, en la fabricación de pólvora y vulcanizado de caucho, los sulfitos se usan para blanquear el papel y el fósforo. el tiosulfato de sodio o amonio se emplea en la industria cinematográfica como "fijador" ya que disuelve el bromuro de plata; y el sulfato de magnesio tiene sus diversos como laxante, exfoliante, o suplemento nutritivo para plantas; en la industria enológica como antiséptico, uno de sus usos principales es como anhídrido sulfuroso, el azufre tiene sus aplicaciones como fungicida y en la manufacturación de fosfatos fertilizantes.

1.3.4 Carbón activado.

Los primeros usos de materiales a base de carbón fueron en aplicaciones médicas, para ello usaban carbón vegetal como adsorbente preparado a partir de madera carbonizada, así lo describen los griegos en un papiro encontrado en Tebas que data de 1550 a.c, posteriormente, los griegos amplían su uso para filtrar el agua, con el fin de eliminar malos olores y sabores y prevenir enfermedades. De igual forma, se sabe que los barcos fenicios almacenaban el agua para beber en barriles de madera parcialmente quemados en su interior. Sin embargo, la primera aplicación documentada del uso de carbón activo en fase gas, se da en 1793 por el Dr. D. M. Kehl quien usa carbón vegetal para eliminar olores emanados por la gangrena; el mismo doctor lo usaba también para filtrar el agua para beber.

La primera aplicación industrial del carbón activado tuvo lugar en Inglaterra, en 1794, donde se usó como decolorante en la industria del azúcar, aun cuando la patente se publica hasta 1812. En 1854 tiene lugar su primera aplicación a gran escala cuando un alcalde de Inglaterra ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de los drenajes. En 1872, aparecen las primeras máscaras con filtros de carbón activado usadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio. No es sino hasta 1881, cuando Kayser introduce el término adsorción para describir como los materiales carbonizados atrapaban a los gases. En fechas cercanas, Von Raphael Ostrejko, quien se considera como el inventor del carbón activado, desarrolló varios

métodos para producir carbón activado tal y como se conoce hoy en día, en 1901 patentó dos de sus métodos ⁶¹.

A principios del siglo XX se inaugura la primera planta industrial de producción de carbón activado en Alemania; después de esta aparecen más, cuya producción estaba principalmente destinada a la decoloración. La I Guerra Mundial estimuló tanto la producción como la aplicación de los carbones activados. El uso de gases nocivos por parte de los alemanes hizo que los aliados desarrollaran máscaras de gases. El desarrollo de la sociedad en el siglo XX, y como consecuencia de la revolución industrial, afectó también a la producción y aplicaciones de los carbones activados, especialmente en la segunda mitad del siglo al comenzar a establecerse requisitos de calidad en las aguas, aire y las necesidades de recuperación de productos químicos ⁶².

Hoy en día, hasta el último informe sobre análisis estadísticos la empresa British Petroleum de la Energía Mundial - Junio 2017 se observa una gran producción y demanda del producto, según el informe presentado el principal productor de carbón en el mundo es China que cuenta con casi la mitad del carbón producido (46.10%) seguido de Estados Unidos (10.00%), Australia (8.20%), India (7.90%), Indonesia (7.00%) entre otros con producciones menores, China al igual que en producción es también el mayor consumidor (56.6 %) seguido de India (11.0 %), Estados Unidos (9.6 %), indonesia (3.2%), La Federación Rusia (2.3%) entre otros ⁶³.

Actualmente, el carbón activado tiene cientos de aplicaciones diferentes, tanto en sistemas de vapor, como en fase líquida. El mayor consumo a nivel mundial es para aplicaciones en fase líquida siendo éste de hasta un 80 %. Entre sus variados usos podemos mencionar: para purificar agua, desodorizar, adsorber gases, decolorar, o ionizar. Dadas sus características muy versátiles, los hacen valiosos en las industrias de minería, vitivinicultura, de alimentos, cigarreras, farmacéuticas, fabricación de filtros para control de emisiones, cosméticas y muchísimas otras áreas. En los últimos años, la creciente demanda de nuevos sistemas de almacenamiento de energía ha impulsado la utilización de los carbones activados en electrodos de condensadores eléctricos de doble capa, también llamados supercondensadores. Estos dispositivos son usados en sistemas de copias de seguridad para computadoras, telefonía móvil, sistemas de potencia no-interrumpida, escáner, etc. ⁶⁴.

1.3.4.1 Conceptos de carbón activado.

El carbón activado es un material carbonoso, microcristalino y no grafitico, preparado por carbonización de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, que se ha sometido a un proceso de activación con gases oxidantes, o bien a un tratamiento con adición de productos químicos, con el objeto de aumentar su porosidad y desarrollar su superficie interna, lo que confiere a los carbones activados una alta capacidad adsorbente

La materia prima para la preparación de estos materiales es muy variada, abarcando desde turba, lignito, hulla, breas, huesos de aceituna, hasta cáscaras de fruta y cualquier tipo de residuo lignocelulósico; actualmente, también se están obteniendo carbones activados a partir de diversos polímeros sintetizados artificialmente [65].

1.3.4.2 Características físicoquímicas.

A) Composición química.

Los carbones activados están formados por átomos distintos al carbono, de los cuales encontramos N, O, S y H. estos se encuentran formando distintos grupos superficiales, los grupos oxigenados son los más importantes y abundantes en la superficie, se forma como consecuencia de la reacción química entre los átomos de carbono y el oxígeno que puede estar en la materia prima o en el agente oxidante presente en el medio de reacción.

La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75 - 80% en carbono, 5 - 10% en cenizas, 6 % en oxígeno y 0,5% en Hidrógeno ⁶⁶.

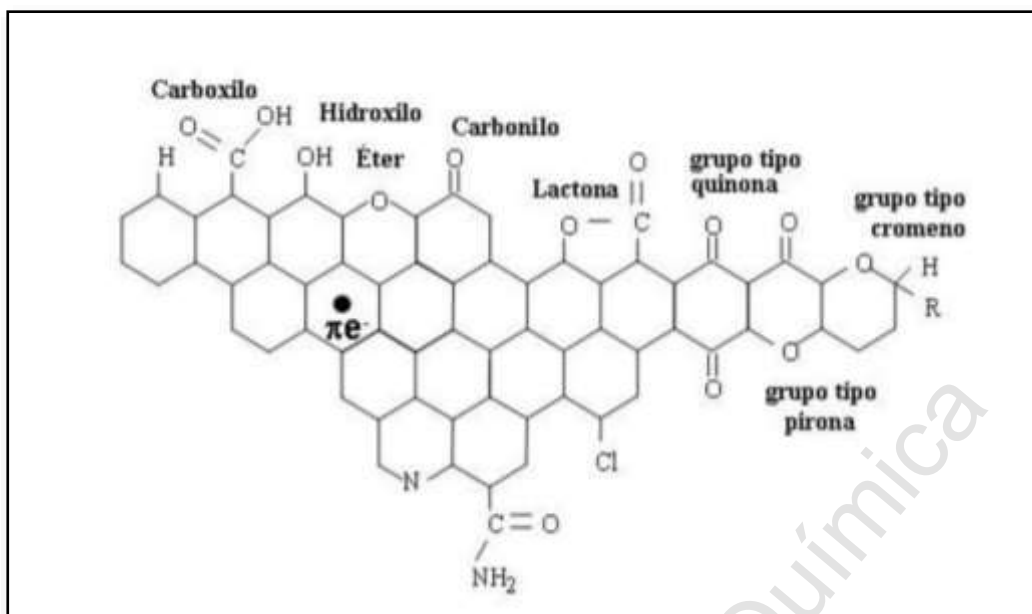


Figura 2. Representación de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse en un carbón.

Fuente: Manual del carbón ⁶⁶.

B) Estructura física.

La característica principal de los carbones activados es la variada estructura porosa que contienen, la cual está constituida por láminas de grafito que se encuentran de forma desorganizada; los espacios que se forman entre lamina y lamina se denomina porosidad del carbono, de ello depende el poder para adsorber y de la capacidad que tendrá el carbón activado para retener moléculas y átomos de diferentes tamaños.

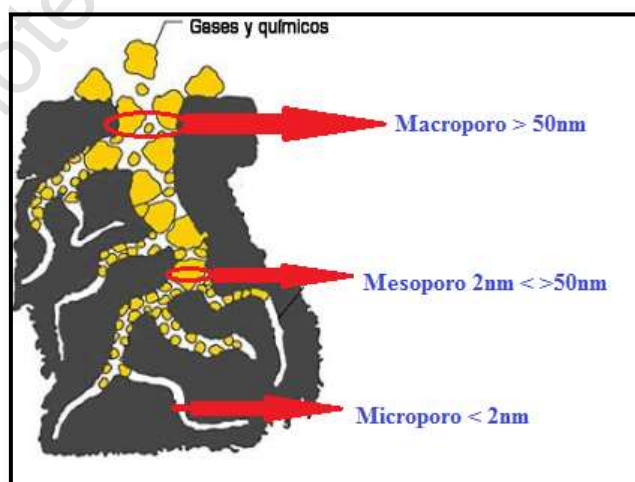


Figura 3. Esquema del tamaño de poro en un carbón activado.

Fuente: Manual del carbón ⁶⁶.

También la densidad nos indica el volumen del adsorbente por un peso dado que puede ocupar, carbones activados menos densos tienen mayor capacidad de adsorción, si la estructura porosa es la misma que de carbones activados más densos.

En cuanto al área superficial y el tamaño de partícula están relacionadas con la capacidad de adsorción; si el tamaño de partícula disminuye el área superficial aumenta y con ellos también aumenta la capacidad de adsorción.

Y por último la dureza es la resistencia del carbón activado a la abrasión (dureza) es la habilidad de soportar a la degradación mecánica durante un proceso.

1.3.5 Proceso de activación.

El proceso de activación consiste básicamente en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable entre otros.

Debido a este proceso el área superficial puede incrementar su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos, pudiendo alcanzarse áreas de 1200 -1500 m²/g de carbón.

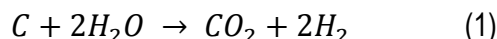
A) Activación física.

El proceso de activación física se realiza en dos etapas, la carbonización de la materia prima y la activación del sólido carbonizado. Durante la carbonización la materia prima llega al rojo vivo para expulsar los hidrocarburos, pero sin el suficiente aire para llegar a la combustión, en ella se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria y los átomos de carbonos se organizan en estructuras microcristalinas conocidas como "cristalitas gráficas elementales". Entre estos microcristales hay espacios libres, debido a que su ordenamiento es irregular.

La activación se realiza en una segunda etapa a temperatura entre 800 y 1100 °C en presencia de un oxidante como agente activante. La activación propiamente dicha, puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de esta. Consiste en hacer reaccionar el agente activante con los átomos de

carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produce un “quemado selectivo” que va horadando progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta formar en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: oxígeno (raramente a escala industrial), aire, vapor de agua (el más usado) y CO_2 .

La activación con vapor de agua se lleva a cabo a temperaturas entre $850\text{-}950^\circ\text{C}$, la principal reacción que sucede es.

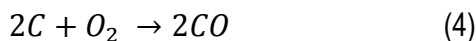


Parte del hidrógeno formado se adsorbe en los centros activos de la superficie del carbono reduciendo la activación del material producido, a la vez disminuye la velocidad de reacción.

La activación con CO_2 implica una reacción menos energética en comparación con el vapor de agua y requiere temperaturas mayores ($850\text{-}1110^\circ\text{C}$). al ser el CO_2 una molécula de mayor tamaño que la del vapor de agua, se produce una difusión más lenta a través de la estructura porosa de carbono, disminuyendo así la cantidad de microporo. La reacción de activación es.



El uso de oxígeno como agente activante es menor que en los casos anteriores, debido a la dificultad de mantener unas condiciones de operación estacionarias en el horno ya que la reacción es extremadamente exotérmica y produce sobrecalentamientos locales que disminuyen la homogeneidad del carbón activo final, las reacciones que ocurren son las siguientes:



Esta reacción produce una gran cantidad de óxidos sobre la superficie y una disminución en el rendimiento a carbón.

B) Activación química.

La activación química se basa en la deshidratación mediante sustancias químicas y a una temperatura media de 400 a 600°C , la cual depende de la sustancia química utilizada para activar el carbón; en este caso la activación suele tener lugar en una única

etapa, no obstante, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente químico activante. Existen numerosos compuestos que pueden usarse como agentes activantes, sin embargo, los más usados industrialmente son el cloruro de zinc (ZnCl_2), el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el hidróxido de potasio (KOH)⁶⁷.

1.3.6 Proceso de adsorción.

La adsorción implica la concentración de uno o más componentes de un gas o un líquido en la superficie de un sólido. El sólido se denomina adsorbente y las moléculas adsorbidas en la superficie del sólido, con mayor concentración que en la fase fluida, se conocen como adsorbato. La adsorción se establece debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas del fluido y la superficie sólida. Si las fuerzas son de tipo van der Waals, conllevan una fisisorción sobre la superficie del adsorbente, resultado de interacciones intermoleculares débiles entre el sólido y el fluido. La adsorción activada o quimisorción ocurre cuando se forman enlaces químicos entre las moléculas de fluido y la superficie adsorbente. Normalmente, la quimisorción provoca la adsorción de una monocapa sobre la superficie adsorbente. La energía de adsorción en fisisorción es muy inferior a la que se implica en un enlace químico, y por tanto la reversibilidad del proceso se obtiene, bien sometiendo al sistema a un calentamiento o bien a vacío, de forma que se disminuya la presión del adsorbato. La fisisorción es un fenómeno exotérmico, aunque la energía puesta en juego es siempre superior a la correspondiente al fenómeno de condensación. Cuando la adsorción se produce en poros de pequeño tamaño, la energía implicada aumenta considerablemente.

Una de las formas más habituales de representación del equilibrio de adsorción es mediante la relación entre la cantidad adsorbida y la presión, en el caso de gases o vapores, o la concentración en la fase líquida, en el caso de adsorción de líquidos, para una temperatura determinada. Esta relación se conoce como isoterma de adsorción para un determinado sistema adsorbato-adsorbente.

1.3.6.1 Isotherma de adsorción.

Las isotermas de adsorción son las funciones matemáticas más usadas para describir los procesos de adsorción. Se construyen relacionando la capacidad de adsorción del adsorbente (q) versus la concentración o presión en equilibrio de su precursor en el fluido, manteniendo constante las otras variables involucradas (pH, masa

del adsorbente, tiempo de contacto, entre otras). Esta relación depende considerablemente de la temperatura del sistema, por ello se obtiene a temperatura constante.

Cuando el proceso de adsorción se lleva a cabo en un sistema sólido-gas, la isoterma nos ayuda también a determinar el área superficial del adsorbente, el volumen de poros y la distribución de estos por tamaño. Así también, proporciona información relevante sobre la magnitud del calor de adsorción y la adsortividad del gas o vapor sobre el adsorbente.

Las isotermas de adsorción, se pueden clasificar atendiendo a seis tipos.

- ✓ **La isoterma de tipo I.** Es cóncava hacia el eje de abscisas, en el que se representa la presión relativa, y la cantidad adsorbida se aproxima a un valor constante al aumentar la presión relativa. Las isotermas de este tipo corresponden a sólidos microporosos. El límite de adsorción está determinado, en mayor extensión, por el volumen accesible frente al tamaño de poro.
- ✓ **La isoterma de tipo II.** Es la forma normal de isoterma que se obtiene con un sólido no poroso o macroporoso. Representa una adsorción en monocapa y multicapa sin restricciones. Se admite frecuentemente que el punto B, señalado en la Figura 2.1, indica el valor de presión relativa para el cual el recubrimiento de la monocapa se ha completado, indicando así el principio de adsorción por multicapa.
- ✓ **La isoterma de tipo III.** Es convexa hacia el eje de abscisas para todo el intervalo de presión relativa. Este tipo de isoterma se presenta en materiales macroporosos o no porosos cuando existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Por tanto, al ser las interacciones adsorbato-adsorbente menores, no se observa el efecto de un campo de fuerzas a bajas presiones relativas.
- ✓ **La isoterma de tipo IV.** Presenta un ciclo de histéresis, el cual se asocia con la condensación capilar propia de la adsorción/desorción en mesoporos, y un valor límite en la cantidad adsorbida para el intervalo superior de presión relativa. La parte inicial de la isoterma se atribuye a la adsorción en monocapa, puesto que coincide con la primera región de la isoterma de tipo II. Este tipo de isoterma se presenta en los materiales adsorbentes mesoporosos.

- ✓ **La isoterma de tipo V.** Se obtiene para materiales mesoporosos, pues presenta un ciclo de histéresis, cuando existe poca afinidad entre el adsorbato y el adsorbente. Es muy poco frecuente.
- ✓ **La isoterma de tipo VI.** Representa la adsorción escalonada en multicapa sobre una superficie uniforme no porosa. Cada uno de los escalones que presenta corresponde a una capa adsorbida. Suele presentarse, por ejemplo, en la adsorción de argón a la temperatura del nitrógeno líquido (77 K) sobre negro de humo grafitizado ⁶⁸.

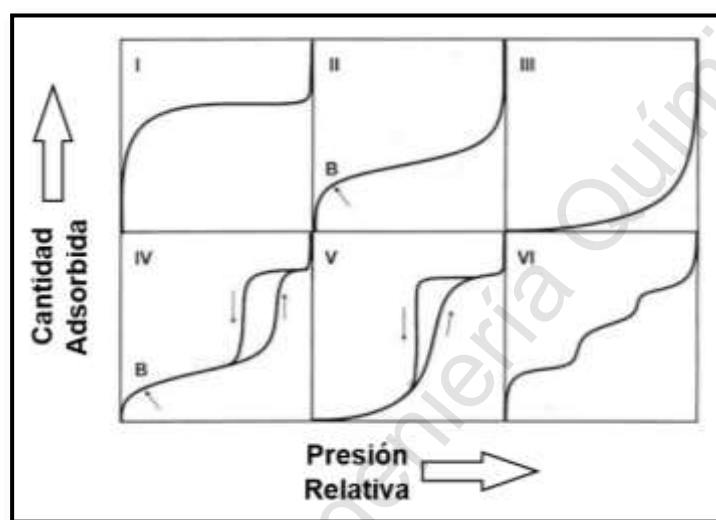


Figura 4. Comportamiento de los 6 tipos de isothermas.

Fuente: García, V. y Machado. R (2011). *Diseño preliminar de una planta para la obtención de carbón activado*

A) Isotherma de Freundlich.

En la que se asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. También en esta isoterma se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que sólo se adsorbe una monocapa ⁶⁹.

Es una de las fórmulas más empleadas para el tratamiento de datos experimentales de las isothermas para describir las características de la adsorción con carbón activado, la fórmula es la siguientes.

$$\frac{X}{m} = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Donde

- X/m : cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente(carbón)

- C_e : concentración de equilibrio del adsorbato en la solución después de la adsorción.
- K_f y n : constantes empíricas.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación de (X/m) y C , empleando la ecuación anterior de la siguiente forma.

$$\log \left(\frac{X}{m} \right) = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

B) Isoterma de Langmuir.

Se basa en la hipótesis que todos los centros activos de adsorción son equivalentes y que la capacidad de una molécula para unirse a la superficie es independiente de si hay o no posiciones próximas ocupadas. Además, la adsorción se restringe a una monocapa y no existen interacciones laterales entre las moléculas del adsorbato.

Se define de la siguiente manera

$$\frac{X}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \quad (7)$$

Donde:

- X/m : cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente(carbón)
- a, b : constantes empíricas.
- C_e : concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción

70.

1.3.7 Aplicaciones del carbón activado.

- Descafeinado con agua
- Remoción de impurezas del agua potable.
- Decoloración de azúcar, miel, caramelos.
- Tratamiento de agua en procesos industriales.
- Tratamiento contra intoxicaciones agudas.
- Decoloraciones de licores, jugos, vinagre.
- Tratamiento terciario de aguas residuales.
- Purificación de aire y gases industriales.
- Respiradores de cartucho (Mascarillas para gases)
- Eliminación de olores en lugares cerrados: cocinas, bodegas, refrigeradores, etc.

- Purificación de aire comprimido (tanques de buceo y hospitales)
- Adsorbente de etileno para evitar la maduración prematura de frutas y verduras.
- Tratamiento contra intoxicaciones agudas.
- Tratamiento de llagas, quemaduras, o heridas, con apósitos de carbón activado impregnado con plata.
- Recuperación de oro, plata y otros metales.

1.3.8 Precursor.

A) *Persea american* (palta).

Los antecesores del género *Persea* surgieron en la parte septentrional de América del Norte, pero entre el Mioceno y el Plioceno migraron hacia Mesoamérica. Se piensa que la especiación que dio a lugar a la *Persea american*, puede haber tenido como factor principal los procesos geológicos ocurridos en México. La evidencia fósil, sugiere que especies similares de este dieron aún más, hasta el norte de California (EE. UU.), hace millones de años, en un momento en que el clima de esa región era más propicio.

Existen evidencia de su consumo en el valle de Tehuacán (Puebla, México), que tienen entre 9000 y 10000 años de antigüedad, su domesticación ocurrió en la región mesoamericana, al rededor del año 5000 a.C. y alrededor del año 3000 a.C. se consumía en Caral, en el actual Perú.

Se dividen en tres variedades: mexicana, guatemalteca y antillana; los ejemplares de *Persea american* originarios de las zonas altas del centro y del este de México generan la variedad mexicana, los arboles originarios de las zonas altas de Guatemala generan la variedad guatemalteca; la variedad antillana proviene de la zona de las Antillas, y se cree que fue la primera variedad encontrada por los europeos, al ser esa la primera zona a la que llegaron.

Existen discrepancias con respecto al origen de la raza antillana, puesto que también cabe la posibilidad de que los primeros ejemplares de aguacate hubieran sido introducidos en las Antillas desde México por los españoles o los ingleses durante la colonización.

Las tres variedades de *Persea american* fueron mezclando naturalmente entre ellas por medio de su propio sistema de reproducción. El resultado de estas fusiones,

producida por medio de la polinización cruzada, dieron origen a incontable variedad híbridas naturales indefinidas.

A partir de la década de los 1900, se comenzaron a seleccionar los ejemplares de esta especie, con mejores atributos para ganar consumidores en los mercados, dando origen a los distintos cultivares que encabezaron los mercados mundiales hasta los años 1930. Las nuevas variedades se comercializaron bien, hasta que en 1935 se patentó en los Estados Unidos una nueva variedad llamada *Hass*, de progenitores desconocidos, originada en La Habrá, un lugar de California, donde Rudolph Hass la detectó entre los árboles de su huerto.

B) Producción mundial.

La palta es el tercer producto más importante de la canasta de agro-exportaciones, detrás del café y la uva. De acuerdo a cifras del Ministerio de Agricultura y Riego (Minagri), en el 2017, el Perú exportó 247 mil toneladas de palta (principalmente variedad *Hass*), lo que representó un incremento de 27% a lo registrado en el 2016, y convirtió a nuestro país en el segundo productor mundial de palta.

De esta manera, las paltas vendieron \$ 580 millones, lo que representó un aumento de 46% con respecto al 2016. La producción nacional se concentró en los departamentos de La Libertad, Lima, Ica y Junín, que explican el 80% de las paltas. Los destinos más importantes para este producto fueron: Holanda, Estados Unidos, España, Inglaterra, China y Chile. Estos países adquirieron el 95% del valor exportado de palta peruana en el 2017.

C) Posicionamiento en el mundo.

De acuerdo con cifras del Trade Map al 2016, el Perú es considerado como el segundo proveedor mundial de palta en volumen, siendo solo superado por México. El Minagri destaca que este importante impulso en la colocación de palta en el mercado mundial responde a la intervención del Servicio Nacional de Sanidad Agraria (Senasa), que entre los años 2015 y 2016 pusieron en marcha protocolos fitosanitarios para el acceso de nuestra fruta al mercado de China, que involucra a 1,400 millones de consumidores.

Gracias a la suscripción de este protocolo fitosanitario entre el Perú y China, nuestro país logró explicar en el 2016 el 14% de la cuota de palta importada por China

1.4 Problema.

¿Influye la temperatura de impregnación del azufre, sobre carbón activado de pepa de *Persea american* (Palta), en el grado de adsorción de Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+} presentes en soluciones acuosas?

1.5 Hipótesis.

La temperatura de impregnación del azufre, sobre carbón activado de pepa de *Persea american* (Palta), influye en el grado de adsorción de Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+} presentes en soluciones acuosas.

1.6 Justificación.

El Perú es un país que depende mucho de la minería, pero es sabido también la problemática observada en los últimos años, y que ha generado múltiples problemas con los pobladores de las zonas donde éstas industrias desarrollan sus actividades extractivas y de refinación, cuyos efectos inclusive llegan a la costa, lo que se corrobora con altos niveles de concentración de metales en los cuerpos de agua presentes. Por otro lado, los residuos de pepa de palta son materiales de desecho de algunas empresas agroindustriales, así como de actividades culinarias tanto caseras como turísticas, que pueden ser reutilizados como por ejemplo para la obtención de carbón activado.

En el presente proyecto se pretende darle un valor agregado adicional, puesto que impregnado con azufre se sospecha que incrementaría la eficiencia en la adsorción y por tanto de la remoción hasta niveles aceptables de plomo, hierro y cadmio presente en los cuerpos de agua emitidos por diferentes industrias.

El uso de materiales de desecho como materia prima, permite reducir los volúmenes de residuos sólidos, al mismo tiempo que permite la obtención de un material que es amigable con el medio ambiente. La factibilidad de su uso permitiría aportar una nueva propuesta para el tratamiento de efluentes líquidos a la vez que incentivaría el desarrollo y mejoramiento de los cultivos de la palta, al hacerla más atractiva desde el punto de vista económico y medioambiental.

1.7 Objetivos.

1.7.1 Objetivo general.

- Determinar la influencia de la temperatura de impregnación de azufre en carbón activado en la adsorción de Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+} .

1.7.2 Objetivo específico.

- Determinar la temperatura a la cual se obtenga carbón activado de alto grado de adsorción con azul de metileno.
- Preparar carbón activado impregnado con azufre a una proporción de 1 a 1 a diferentes temperaturas
- Evaluar la capacidad de adsorción del CA impregnado obtenido a diferentes temperaturas utilizando soluciones de Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+}

II. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Equipos, Instrumentos y Reactivos.

2.1.1 Equipos.

Tabla 1. Lista de equipos empleados.

Equipos		Características
Mufla Furnace	Marca	Yamato
		Modelo FO110CR
	Capacidad	Temp. Max. 1200°C
Agitador	Marca	IKA® RT10
		• 10 posiciones
	Capacidad	• Rango de velocidad 0 - 1000 rpm • Rango de temperatura de calefacción temp. ambiental - 120 °C
Bomba al vacío	Marca	GAST MANUFACTURING
	Capacidad	Modelo DOA-P504-BN 1/8 HP
Balanza analítica	Marca	OHAUS
	Capacidad	Modelo PA224C Peso max. 220g
Conductímetro	Marca	OHAUS – STARTER 31000C
Estufa	Marca	Memmert
	Capacidad	Temp max. 300°C
Molino de mano	Marca	Corona

2.1.2 Instrumentos.

Tabla 2. Lista de instrumentos empleados

Instrumentos	Características
Vaso de precipitados	Capacidad 100 ml
Probeta graduada	Capacidad 100 ml
Crisoles refractarios	Capacidad 200 ml
Matraz Erlenmeyer	Capacidad 250 ml
Piseta	Capacidad 500 ml
Pinza para crisol	1 unidad
Tamiz	Malla N° 50 (0.29 mm)
	Malla N° 10 (2.00 mm)
Papel filtro	-
Colador	-
Envase de plástico	Capacidad 5 L
Pastillas de agitación	10 unidades

2.1.3 Reactivos.

Tabla 3. Lista de reactivos empleados.

Nombre	Formula
Ácido fosfórico	H_3PO_4 (al 85%)
Bicarbonato de sodio	NaHCO_3
Azul de metileno	$\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$
Azul elemental	S_8
Pepa de palta	-
Nitrato de plomo (II)	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
Nitrato de cadmio tetrahidratado	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Sulfato de hierro heptahidratado	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

2.2 Métodos.

2.2.1 Modelo.

2.2.2 Variables y niveles.

En la siguiente tabla se puede observar las variables y los niveles del diseño experimental.

Tabla 4. Factores y niveles del diseño experimental.

Variables	Factores
Dependiente	Concentración final de las soluciones Temperatura de impregnación
Independiente	Tipo de solución (solución acuosa de metales)

2.2.3 Matriz de diseño.

El diseño experimental utilizado para el análisis de los resultados de las pruebas experimentales fue el diseño de dos variables independientes (temperatura de impregnación desde 300 – 500° C y tipo de solución Pb, Fe y Cd) y aplicado a una sola variable independiente (concentración final de la solución) esto se aplica para tres replicas.

Entonces: $N = a * b * r$

Donde:

N = Numero de pruebas.

a,b = Niveles de variables independientes.

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será

$$N = 6 * 3 * 3 = 54$$

Tabla 5. Matriz de diseño experimental para las concentraciones finales.

Variables		Temperatura de impregnación en °C					
		T0	300	350	400	450	500
Tipos de solución	ppm Pb ⁺²	Y101	Y111	Y121	Y131	Y141	Y151
		Y102	Y112	Y122	Y132	Y142	Y152
		Y103	Y113	Y123	Y133	Y143	Y153
	ppm Fe ⁺²	Y201	Y211	Y221	Y231	Y241	Y251
		Y202	Y212	Y222	Y232	Y242	Y252
		Y203	Y213	Y223	Y233	Y243	Y253
	ppm Cd ⁺²	Y301	Y311	Y321	Y331	Y341	Y351
		Y302	Y312	Y322	Y332	Y342	Y352
		Y303	Y313	Y323	Y333	Y343	Y353

2.2.4 Procedimiento experimental.

- Las pepas de palta (*Persea americana*) del tipo fuerte fueron recolectadas del mercado Covicorti, un aproximado de 1500 g y se procedió al secado a temperatura de 80°C por 24 horas.
- Una vez la muestra seca, se llevó a molienda para reducir el tamaño a aproximadamente 2.0 mm de diámetro; para ello se usó una malla número 10(2.00 mm)
- La muestra se colocó en un envase de plástico grande de 5L y se adicionó ácido fosfórico al 85% (H₃PO₄), la cantidad de ácido/muestra está en relación de 3 a 1; se dejó la mezcla por un periodo de 24 horas.
- La mezcla se neutralizó con bicarbonato de sodio diluido (20 g de NaHCO₃ en 1 L de H₂O), el lavado se realizó por varias veces en un lapso de 6 horas.
- La muestra se lavó con abundante agua potable y las 4 últimas veces con agua destilada hasta que la conductividad del agua del lavado sea similar al del agua destilada (0.5 µS/cm)
- La muestra bien lavada fue colocada en fuentes de metal y puestas en la estufa en un periodo de 24 horas a una temperatura de 80°C.
- Una masa de 42.5 g de muestra se colocó en crisoles refractarios y llevadas al horno tipo mufla para su carbonización respectiva a diferentes temperaturas (desde 300°C hasta 500°) por un periodo de 2 horas.
- La masa de carbón se molió y se tamizó por malla número 50 (0.297mm).

- En un vaso de 250 ml se depositó 100 ml de azul de metileno de 100 ppm con una masa de carbón activado de 0.5 g, de igual manera se hizo para las demás muestras.
- El proceso se repitió para masas diferentes de carbón desde 0.5 g hasta 1.3 g en intervalo de 0.2 g
- La muestra se filtró y del filtrado se determinó la absorbancia en un espectrofotómetro UV visible a una longitud de onda de 665 nm.
- Para determinar la concentración final de AM se usó la curva de calibración de concentración de AM vs absorbancia (ver tabla N°6 y figura 6).
- Con los resultados se determinó la masa óptima de carbón necesaria a usar, determinada por el rendimiento de cada uno.
- La cantidad de carbón restante se llevó a la mufla nuevamente, pero ahora juntamente con azufre elemental en una proporción de 1 a 1 (azufre/carbón activado), el periodo de carbonización fue de 2 horas a diferentes temperaturas (desde 300 °C hasta 500°C)
- Tres soluciones de 1000 ml de Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+} se prepararon a concentraciones de 100 ppm de cada una.
- En un vaso de precipitado de 250 ml se colocó 0.5 g de carbón activado impregnado con 100 ml de la solución y se dejó en agitación por un periodo de 2 horas a una velocidad de 180 rpm. El procedimiento se repitió para los carbones impregnados a diferentes temperaturas y para las soluciones de los tres metales.
- Las soluciones se filtraron y se procedió a tomar lecturas mediante espectrofotometría de absorción atómica y se determinó la concentración final de los metales Pb^{2+} , Fe^{2+} y Cd^{2+} en cada solución.

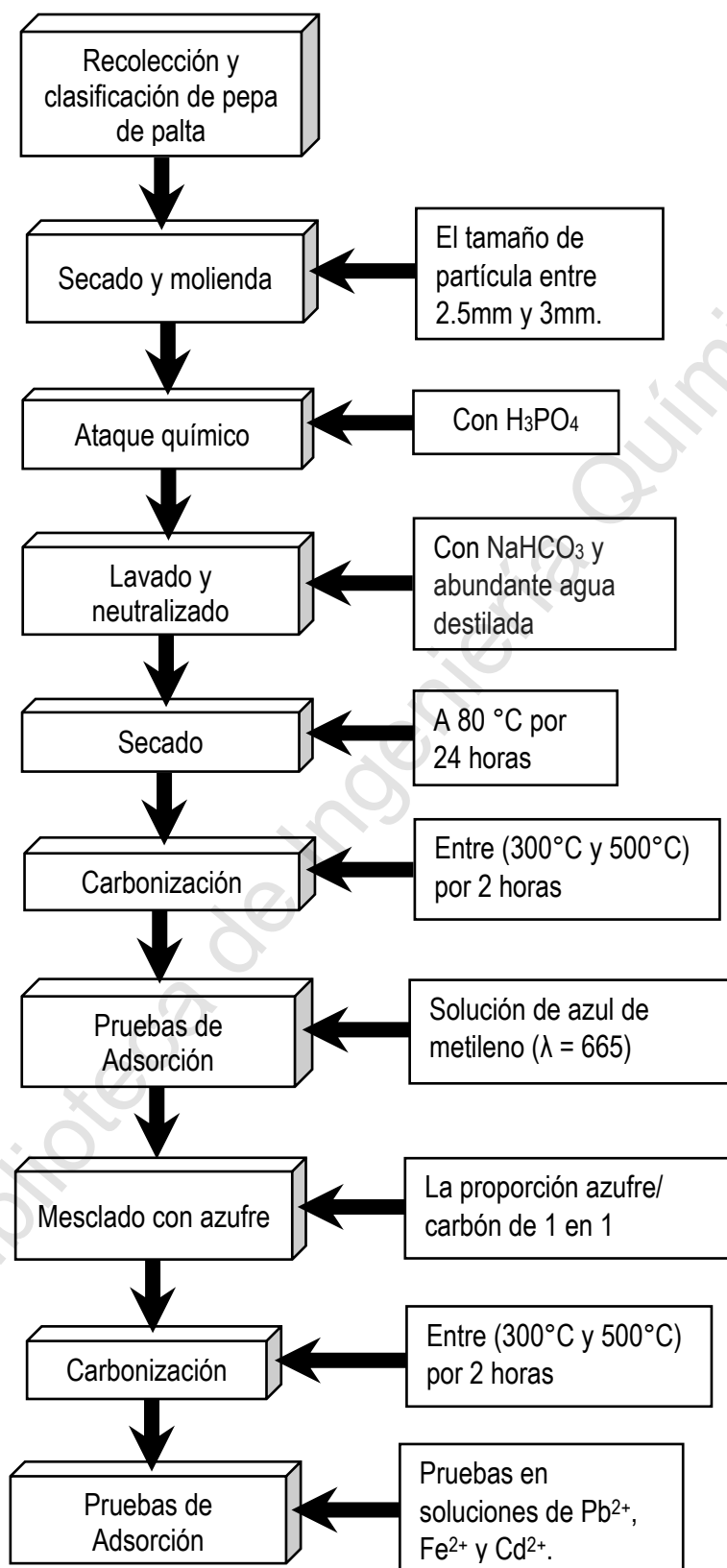


Figura 5. Diagrama de bloques del procedimiento experimental

III. RESULTADOS.

3.1 Parámetros controlados en la etapa de carbonización.

Temperatura de carbonización	=	300 – 500 °C
Tiempo de carbonización	=	2 horas
Tiempo de agitación	=	2 horas
Tamaño de partícula	=	mallá 50
Velocidad de agitación	=	180 rpm
Concentración de azul de metileno	=	100 ppm

Para determinar la temperatura a la cual se obtuvo un mejor carbón, fue necesario construir una curva de calibración con azul de metileno la cual se muestra en la Tabla 6: Se uso para determinar la concentración final de azul de metileno para cada carbón, se tuvo que hacer lecturas de absorbancia para cada concentración de azul de metileno a una longitud de onda de 665 nm.

Tabla 6. Absorbancia y concentración para la curva de calibrado.

Lectura	Concentración de azul de metileno (ppm)	Absorbancia $\lambda=665$ nm
1	0	0
2	0.529	0.136
3	1.057	0.2515
4	2.114	0.4905
5	6.342	1.363

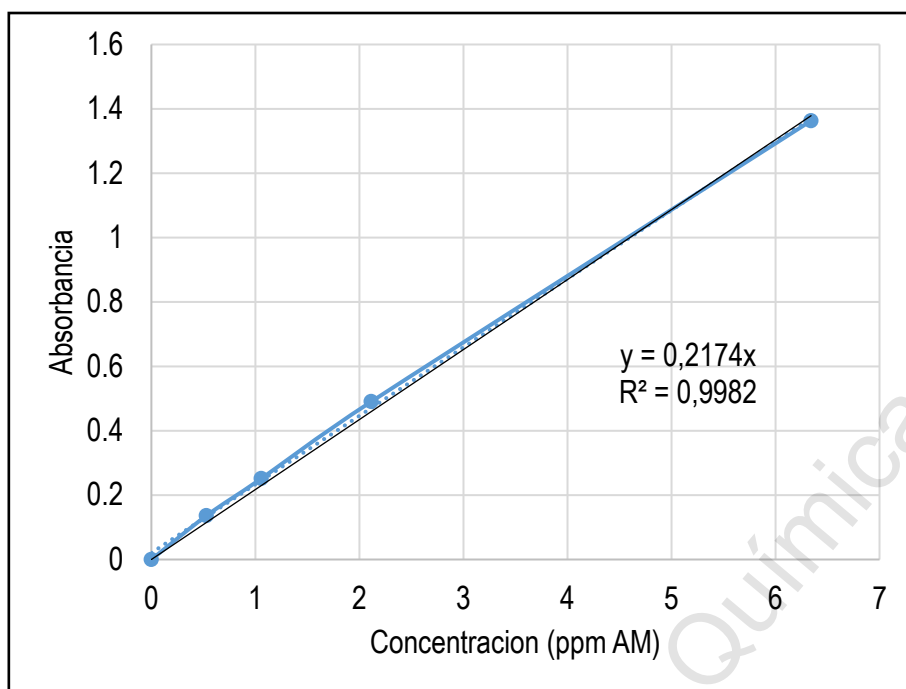


Figura 6. Absorbancia en función de la concentración de AM ($\lambda=665\text{nm}$)

A continuación, se presenta los resultados de las absorbancias para cada carbón producido a diferentes temperaturas de carbonización y las concentraciones iniciales y finales.

Tabla 7. Rendimiento de CA (300 °C) sobre azul de metileno

Masa CA (g)	1,3004	1,1002	0,9017	0,7021	0,5005
1°	0,2050	0,7700	1,8980	2,2170	3,1430
Replica (Absorbancia) 2°	0,2060	0,7720	1,9000	2,2250	3,1690
3°	0,2070	0,7790	1,9080	2,2380	3,1410
Promedio (\bar{X})	0,2060	0,7737	1,9020	2,2267	3,1510
Concentración final (ppm)	0,9476	3,5587	8,7489	10,2423	14,4940
% de remoción	99,0581	96,4625	91,3033	89,8188	85,5924
Rendimiento (mg AM / g CA)	7,6632	8,8203	10,1864	12,8696	17,2040

Se partió de una concentración inicial de 100.6 ppm de AM.

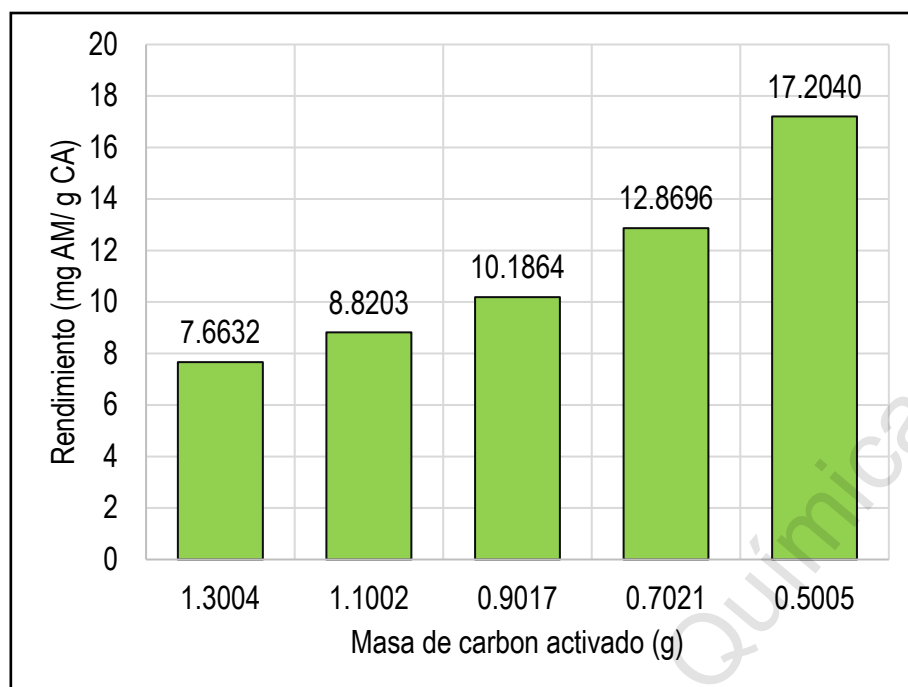


Figura 7. Rendimiento en función de la masa del carbón (300°C)

Tabla 8. Rendimiento de CA (350 °C) sobre azul de metileno

Masa CA (g)		1,3010	1,1019	0,9009	0,7017	0,5011
Replica (Absorbancia)	1°	0,0450	0,0570	0,2210	1,0690	2,3080
	2°	0,0450	0,0570	0,2230	1,0740	2,3350
	3°	0,0440	0,0580	0,2230	1,0890	2,3390
Promedio (\bar{X})		0,0447	0,0573	0,2223	1,0773	2,3273
Concentración final (ppm)		0,2055	0,2637	1,0227	4,9555	10,7053
% de remoción		99,7958	99,7379	98,9834	95,0740	89,3585
Rendimiento (mg AM / g CA)		7,7167	9,1058	11,0531	13,6304	17,9395

Se partió de una concentración inicial de 100.6000 ppm de AM

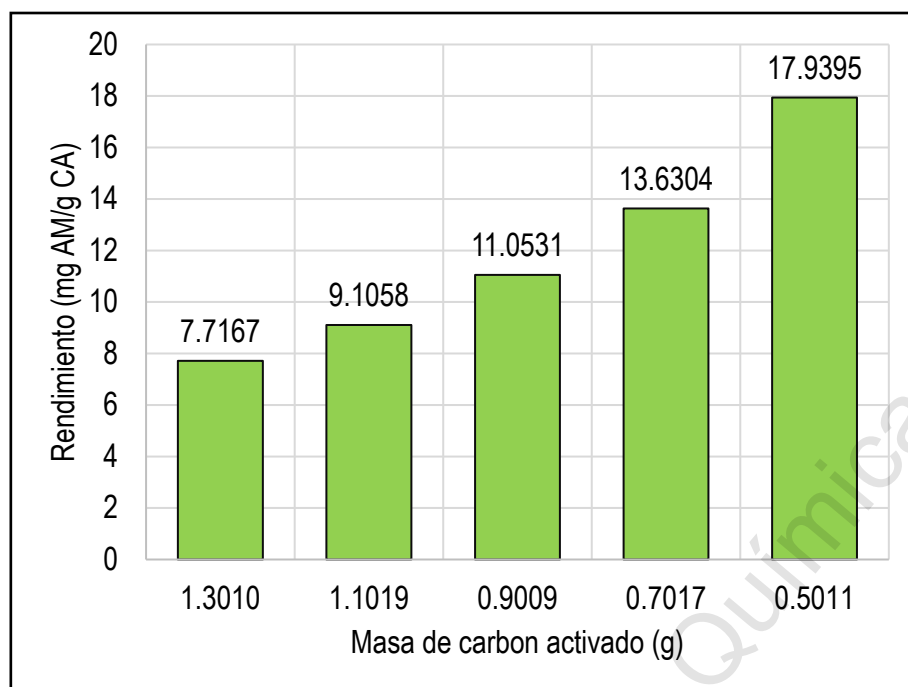


Figura 8. Rendimiento en función de la masa del carbón (350°C)

Tabla 9. Rendimiento de CA (400 °C) sobre azul de metileno

Masa CA (g)	1,3001	1,1014	0,902	0,7023	0,5020
1°	0,0710	0,0840	0,0680	0,1340	0,9940
Replica (Absorbancia)					
2°	0,0680	0,0830	0,0670	0,1340	0,9930
3°	0,0690	0,0830	0,0680	0,1360	1,0060
Promedio (\bar{X})	0,0693	0,0833	0,0677	0,1347	0,9977
Concentración final (ppm)	0,3189	0,3833	0,3113	0,6194	4,5891
% de remoción	99,6842	99,6205	99,6918	99,3867	95,4564
Rendimiento (mg AM / g CA)	7,7441	9,1353	11,1628	14,2931	19,2054

Se partió desde una concentración de 101.0000 ppm de AM

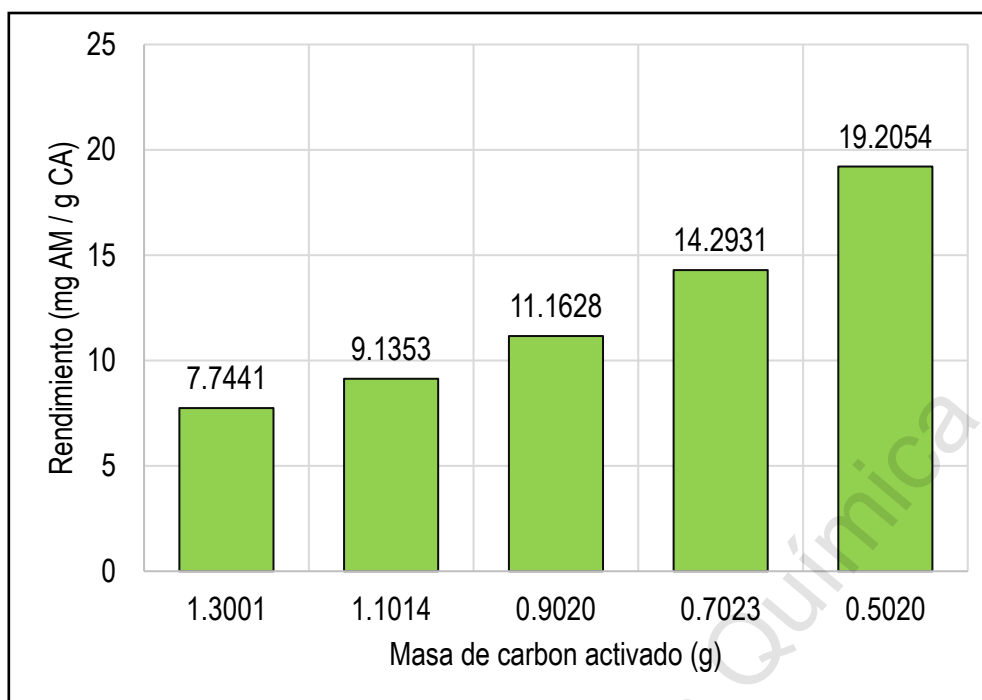


Figura 9. Rendimiento en función de la masa del carbón (400°C).

Tabla 10. Rendimiento de CA (450 °C) sobre azul de metileno

Masa CA (g)		1,3002	1,1012	0,902	0,7014	0,5009
Replica (Absorbancia)	1°	0,0120	0,0050	0,0110	0,0520	0,9620
	2°	0,0110	0,0060	0,0110	0,0540	0,9630
	3°	0,0110	0,0050	0,0110	0,0540	0,9640
Promedio (\bar{X})		0,0113	0,0053	0,0110	0,0533	0,9630
concentración final (ppm)		0,0521	0,0245	0,0506	0,2453	4,4296
% de remoción		99,9483	99,9757	99,9499	99,7569	95,6099
Rendimiento (mg AM / g CA)		7,7563	9,1605	11,1806	14,3505	19,2594

Se partió desde una concentración de 100.9000 ppm de AM

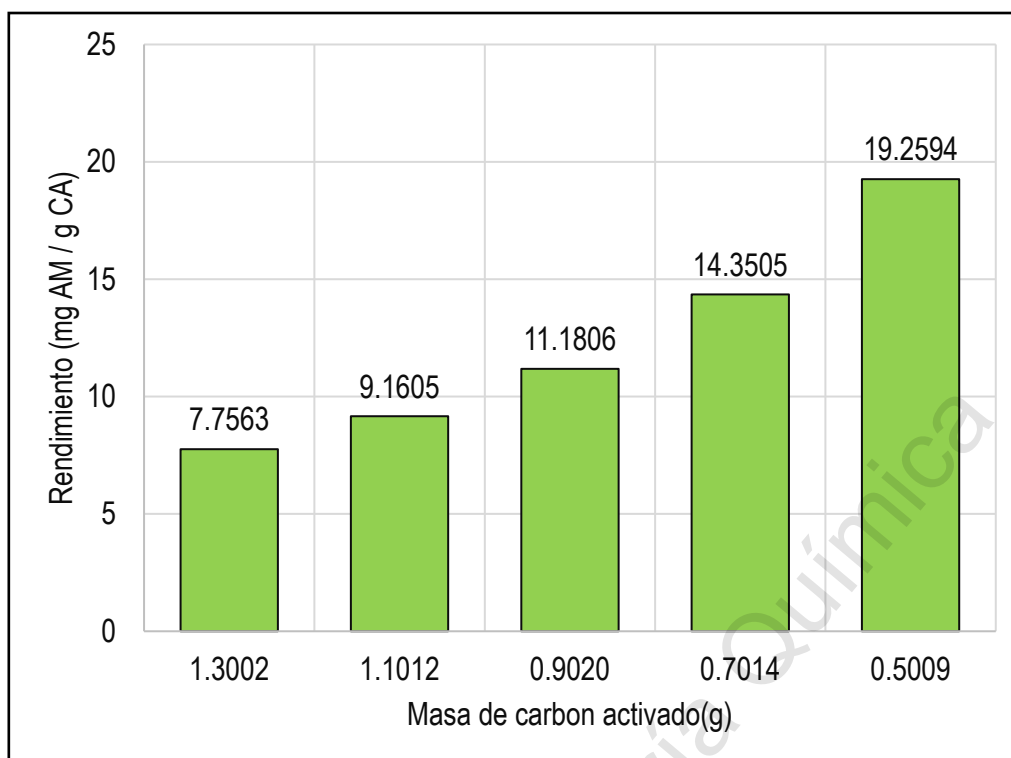


Figura 10. Rendimiento en función de la masa del carbón (450°C)

Tabla 11. Rendimiento de CA (500°C) sobre azul de metileno

Masa CA (g)	1,3011	1,1019	0,9009	0,7017	0,5011
1°	0,0110	0,0080	0,0290	0,8450	1,7550
Replica (Absorbancia) 2°	0,0110	0,0080	0,0290	0,8610	1,7530
3°	0,0110	0,0080	0,0290	0,8580	1,7560
Promedio (\bar{X})	0,0110	0,0080	0,0290	0,8547	1,7547
concentración final (ppm)	0,0506	0,0368	0,1334	3,9313	8,0711
% de remoción	99,9499	99,9635	99,8678	96,1038	92,0008
Rendimiento (mg AM / g CA)	7,7511	9,1536	11,1851	13,8191	18,5250

Se partió desde una concentración inicial de AM de 100.9000 ppm.

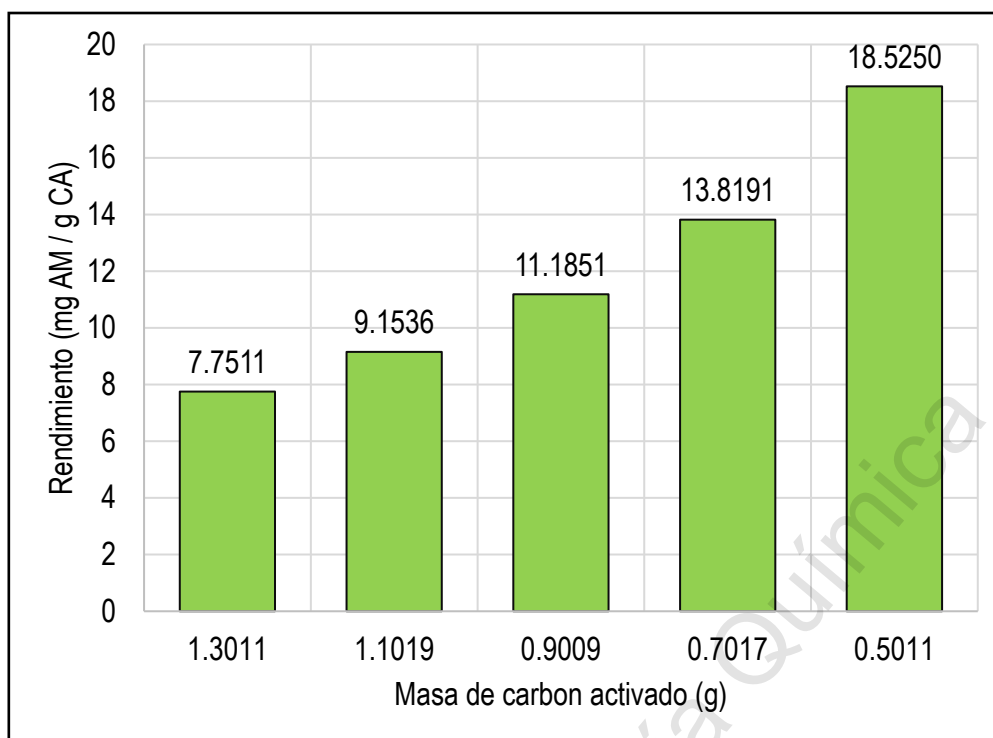


Figura 11. Rendimiento en función de la masa del carbón (500°C).

Tabla 12. Rendimiento de CA a diferentes temperaturas

N°	Temperatura (°C)	Absorbancia	ppm de AM	% de Remoción	Rendimiento (mg AM / g CA)
1	300	3.1510	14.4940	85.5924	17.2040
2	350	2.3273	10.7053	89.3585	17.9395
3	400	0.9977	4.5891	95.4564	19.2054
4	450	0.9630	4.4296	95.6099	19.2594
5	500	1.7547	8.0711	92.0008	18.5250

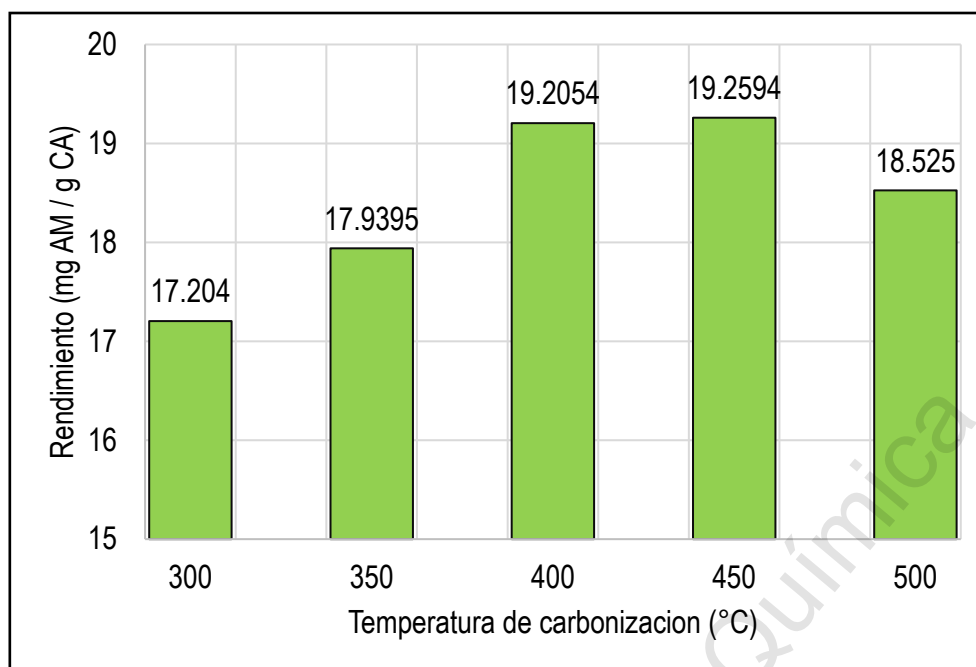


Figura 12. Rendimiento en función de la Temperatura.

3.2 Influencia de la temperatura de impregnación del azufre sobre carbón activado.

En esta etapa de experimentación se trabajó con tres metales plomo, hierro y cadmio a diferentes concentraciones y tomando en cuenta los resultados finales de la Tabla 12 de carbón activado para escoger el carbón activado con mayor rendimiento, dichas muestras fueron sometidas a agitación constante durante 2 horas a una velocidad de 180 rpm.

Tabla 13. Remoción de plomo en CA impregnado a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	300	350	400	450	500
Masa CA (g)	0.5015	0.5008	0.5021	0.5018	0.5014
1°	29,4840	8,8440	5,2440	14,9640	27,0300
Replica (ppm)					
2°	29,0800	7,4620	6,3790	15,4210	25,3480
3°	29,3650	8,2590	5,4680	14,8920	27,5730
Promedio (\bar{X})	29,3097	8,1883	5,6970	15,0923	26,6503
Desviación (σ)	0,2076	0,6937	0,6012	0,2869	1,1601
%CV	0,7083	8,4719	10,5521	1,9010	4,3529
% de remoción	66,2136	90,5610	93,4329	82,6025	69,2792
Remoción (mg Pb²⁺/g CA* min)	0,0954	0,1307	0,1345	0,1190	0,0999
Plomo inicial	86.750 ppm				

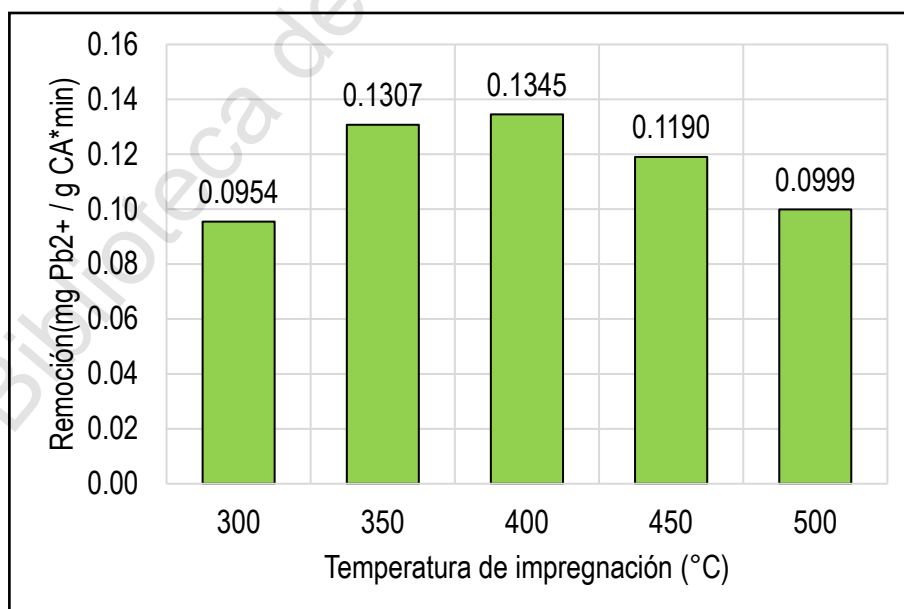
**Figura 13.** Remoción de plomo en función de la temperatura.

Tabla 14. Comparación de remoción de plomo entre los carbones.

Muestra	Concentración final ppm Pb ²⁺	% de degradación	Remoción (mg Pb ²⁺ /g CA* min)
CA	1,746	97.9869	0.1409
CA impregnado (400°C)	5,697	93.4329	0.1345

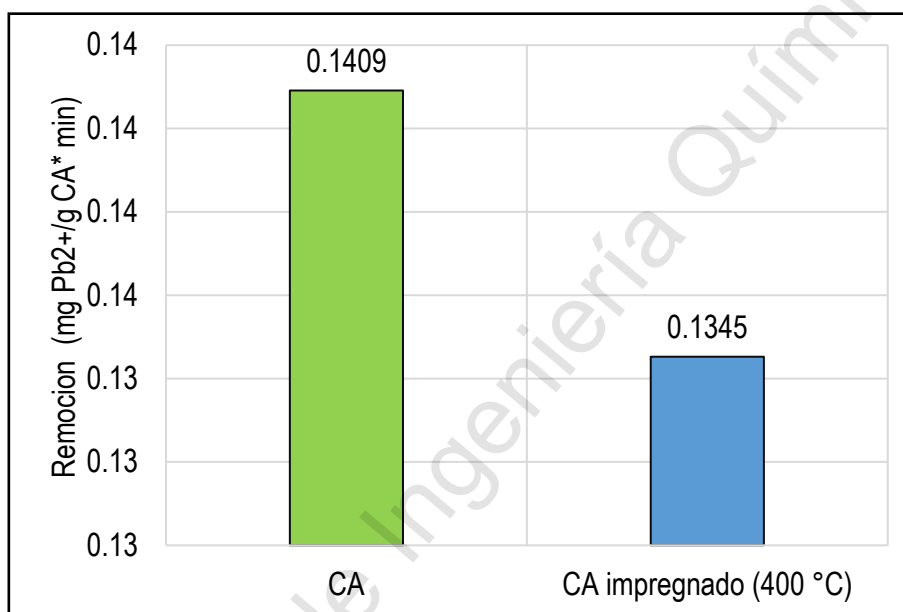
**Figura 14.** Remoción de plomo usando carbones activados

Tabla 15. Remoción de hierro en CA impregnado a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	300	350	400	450	500
Masa CA (g)	0.5019	0.5011	0.5016	0.5023	0.5004
1°	68,0020	68,5250	66,9300	70,3590	73,0200
Replica (ppm)					
2°	68,2350	65,8720	65,3220	71,0290	72,4500
3°	69,8730	66,3540	64,3590	69,9250	71,5620
Promedio (\bar{X})	68,7033	66,9170	65,5370	70,4377	72,3440
Desviación (σ)	1,0196	1,4133	1,2989	0,5562	0,7348
%CV	1,4841	2,1120	1,9820	0,7896	1,0156
% de remoción	15,1811	17,3864	19,0901	13,0399	10,6864
Remoción (mg Fe ²⁺ /g CA*min)	0,0204	0,0234	0,0257	0,0175	0,0144
Hierro inicial	81.00 ppm				

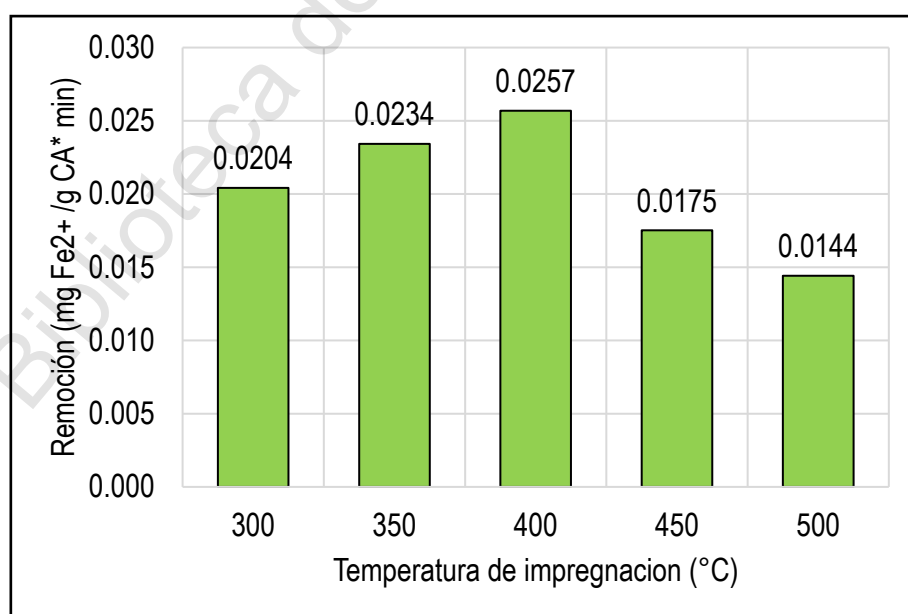
**Figura 15.** Remoción de Hierro en función de la temperatura

Tabla 16. Comparación de remoción de hierro entre los carbones.

Muestra	Concentración final ppm Fe ²⁺	% de remoción	Remoción (mg Fe ²⁺ /g CA*min)
CA	46,787	42,2379	0,0570
CA impregnado (400°C)	65,537	19,0901	0,0257

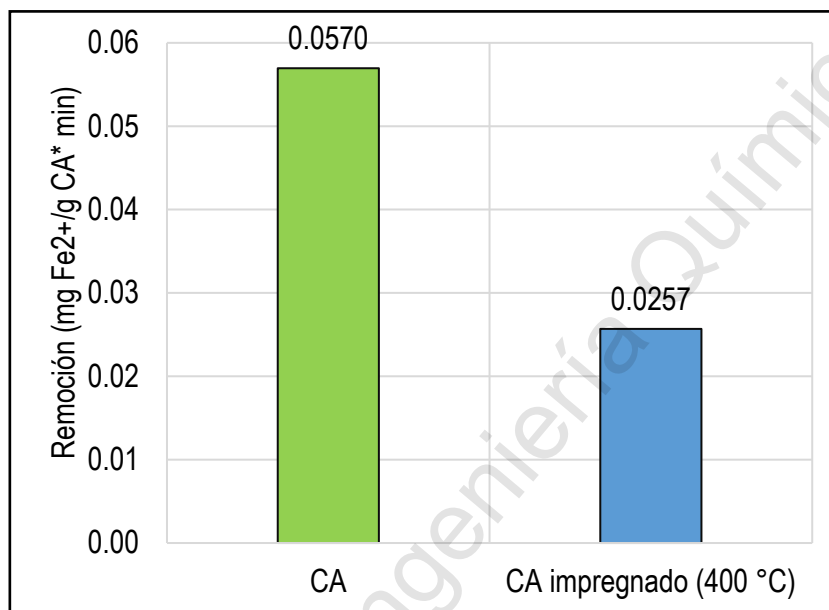
**Figura 16.** Remoción de hierro usando carbones activados.

Tabla 17. Remoción de cadmio en CA impregnado a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)		300	350	400	450	500
Masa CA (g)		0.5008	0.5018	0.5026	0.5017	0.5005
Replica (ppm)	1°	70,9250	63,5300	60,1220	74,0090	78,1590
	2°	71,0230	63,5580	61,3490	74,2560	76,4820
	3°	70,1580	62,4530	60,3580	72,5940	75,3670
Promedio (\bar{X})		70,7020	63,1803	60,6097	73,6197	76,6693
Desviación (σ)		0,4737	0,6300	0,6511	0,8968	1,4054
%CV		0,6699	0,9972	1,0742	1,2181	1,8331
% de remoción		15,0216	24,0621	27,1518	11,5148	7,8494
Remoción (mg Cd ²⁺ /g CA*min)		0,0208	0,0332	0,0375	0,0159	0,0109
Cadmio inicial		83.20 ppm				

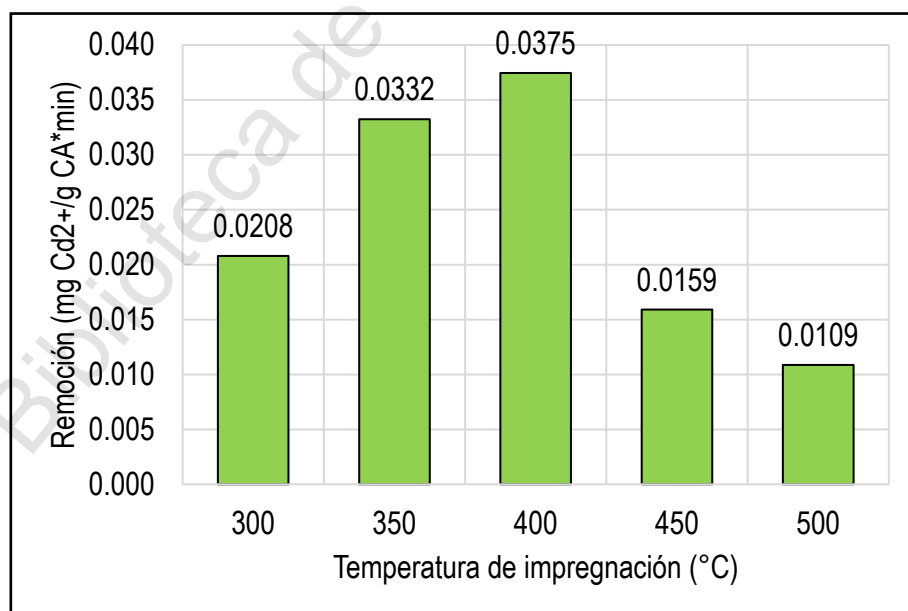
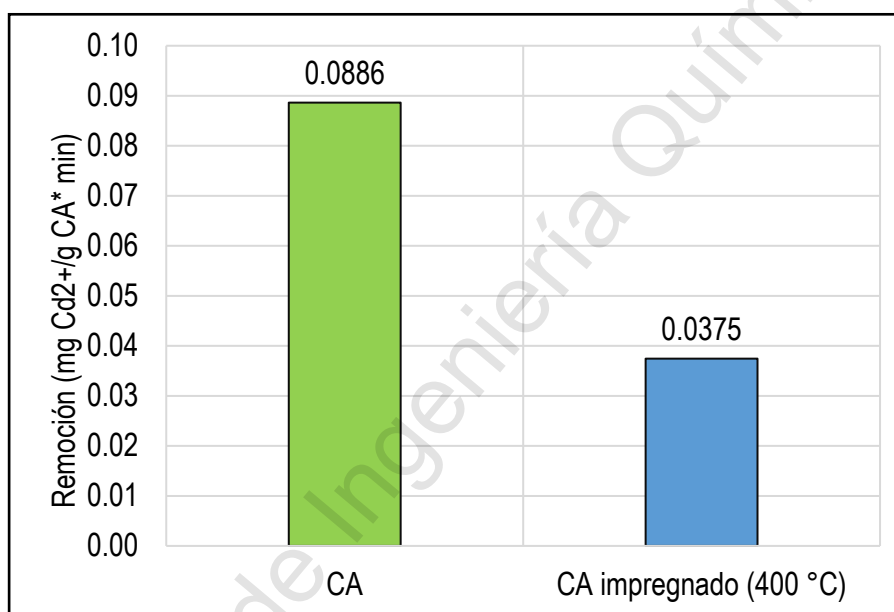
**Figura 17.** Remoción de Cadmio en función de la temperatura.

Tabla 18. Comparación de remoción de cadmio entre los carbones.

Muestra	Concentración final (ppm Cd ²⁺)	% de remoción	Remoción (mg Cd ²⁺ /g CA*min)
CA	29,904	64,0573	0,0886
CA impregnado (400°C)	60,610	27,1518	0,0375

**Figura 18.** Remoción de cadmio usando carbones activados.

➤ **Análisis estadístico de los valores (hipótesis nula)**

En este caso al usar el programa SPSS, programa de análisis estadístico, nos indica que al trabajar con un nivel de confianza de 95% y con un porcentaje de error de 5% ($\alpha = 0.05$); si el valor bilateral es mayor que nuestro α (0.05) ante este caso no se rechaza la hipótesis nula, de lo contrario si el α es mayor que el valor bilateral se rechaza la hipótesis.

Tabla 19. Análisis de datos en SPSS para el plomo

Prueba para una muestra de plomo					
	Valor de prueba = 1.1746				
	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
ppm Finales	4	0,029	15,81280	2,5888	29,0368

Tabla 20. Análisis de datos en SPSS para el hierro

Prueba para una muestra de hierro					
	Valor de prueba = 46.787				
	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
ppm Finales	4	0.00005	22,0008	18,6320	25,3696

Tabla 21. Análisis de datos en SPSS para el cadmio

Prueba para una muestra de cadmio					
	Valor de prueba = 29,904				
	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
				Inferior	Superior
ppm Finales	4	0,0002	39,052	30,555	47,549

IV. DISCUSIÓN.

En la primera etapa de carbonización y pruebas con azul de metileno se determinó que la masa óptima para las posteriores pruebas es de 0.5 g; se tuvo que hacer curvas de dosaje a diferentes masas para cada tipo carbón activado, tanto desde la Tabla 7 hasta la 11, se verifica que la masa empleada de 0.5 g tiene un mayor rendimiento.

De la Tabla 12 se determinó que los carbones obtenidos a diferentes temperaturas (300°C hasta 500°C), el que tuvo un mayor rendimiento fue a 450°C, llegando a alcanzar un valor de 19.2594 mg de azul de metileno por cada gramo de carbón activado y con un mayor valor porcentual de remoción de 95.6099%, esto gracias a su alta superficie interna que posee el CA, si bien porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño como es el caso del azul de metileno.

Posterior a la impregnación de azufre en carbón activado se procedió a aplicar en soluciones de tres metales; para el plomo se partió desde una concentración de 86.75 ppm Pb^{2+} ; donde se alcanzó una remoción máxima de 0.1345 mg de Pb^{2+} /g CAimpregnado* min; de igual forma para la solución de hierro la concentración inicial fue de 65.537 ppm de Fe^{2+} la cual alcanzó una remoción de 0,0257 mg Fe^{2+} /g CAimpregnado* min (el 19.0901% del metal presente en toda la solución fue removido) y por ultimo para la solución de cadmio que se partió de una concentración de 83.2 ppm de Cd^{2+} se obtuvo una mayor remoción de 0.0375 mg Cd^{2+} /g CAimpregnado* min, estos máximos valores se obtuvieron a la temperatura de impregnación de 400°C.

En tal sentido se buscó mejorar el carbón activado basándose en una investigación anterior (Alvarado y Alvarado 2016) donde empleo azufre en proporción de 1 a 2 en relación azufre – carbón donde se logró mejorar la superficie del carbón activado [32]; en nuestra parte experimental se usó una proporción de 1 a 1, pero no se logró mejorar dicho carbón, al contrario, la impregnación del carbón activado con azufre elemental produjo cambio desfavorables en las propiedades del carbón activado, lo cual impidió una mejor adsorción de los metales. Según el artículo publicado por la Corporación Universitaria Lasallista menciona el uso de desulfuro de carbono (CS_2) en la impregnación de carbón activado si se logra

modificar las propiedades de mismo, pero en este caso se usó azufre elemental para la impregnación.

Se realizaron pruebas para comparar el carbón activado y el carbón activado impregnado con azufre, las pruebas fueron hechas en las tres soluciones de plomo, hierro y cadmio; las tablas 14, 16 y 18 muestran los resultados los cuales se ve una diferencia en cuanto al rendimiento, en el caso del plomo el rendimiento tiene resultados similares del 97.9869% de degradación para el CA y 93.4329% para el CAimpregnado, en las pruebas de los metales restantes la diferencia fue notoria para el hierro 42.2397% en CA y 19.0901% en CAimpregnado y por último en cadmio 64.0573% para CA y 27.1518% para el CAimpregnado; si bien en ninguno de los casos se ve una mejora; en el caso del plomo hay un mejor rendimiento debido a los elementos calcófilos donde se indica que el azufre tiene una mejor afinidad por el plomo y en menor grado con el hierro y cadmio; debido al cambio en la estructura de las propiedades del CA ahora también la afinidad no es muy favorable.

Para determinar si la temperatura de impregnación influyó con la adsorción de los tres metales se realizó un análisis estadístico a los datos usando un programa (SPSS Statistic) mediante análisis de medias se determinó que para los tres datos evaluados de los tres metales los valores de significancia son menores al 5% por ende no se rechaza la hipótesis planteada.

Según análisis se determinó que la adsorción del plomo sobre carbón activado sigue el comportamiento cinético de Pseudo segundo orden, según los datos de la Tabla 29 y 30.

V. CONCLUSIONES.

- Se logró determinar que la temperatura de impregnación con azufre sobre el carbón activado si influye se una manera desfavorable en la adsorción de metales pesados como plomo, hierro y cadmio.
- Se logró producir un carbón activado con alta capacidad de adsorción de azul de metileno, el carbón activado con mayor índice de adsorción fue a 450°C, alcanzando un valor de 95.61% de remoción y un rendimiento de 19.26 mg AM/g CA.
- Se evaluó la eficiencia de 5 tipos de carbones impregnados a diferentes temperaturas desde 300°C hasta 500°C usando soluciones de tres metales, encontrando mayor rendimiento en la solución de plomo seguido del cadmio y el hierro, de los cuales hay un mayor rendimiento al imprégnalo a 400°C en comparación al rendimiento de los demás.
- Para todos los carbones activados obtenidos a diferentes temperaturas la masa optima determinada fue de 0.5 g de carbón aproximadamente, en donde se observa un mejor rendimiento.
- El comportamiento del carbón activado a base de pepa de palta sigue el modelo cinético de Pseudo segundo orden con un valor para la constante de velocidad de $0.0037 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

VI. RECOMENDACIONES.

- En el proceso de neutralización de muestra con NaHCO_3 tener mucho cuidado ya que debido al alto contenido de iones en el agua, esto puede generar la obstrucción de los poros en el momento de la carbonización y por ende obtener un carbón con bajo índice de adsorción, en tal caso es necesario medir la conductividad al final del lavado con agua destilada, como se indicó en la parte experimental; tener siempre presente ese detalle.
- Se recomienda buscar otros compuestos que se puedan impregnar sobre carbón activado para mejorar el proceso de adsorción.
- Evaluar otros precursores en la producción de carbón activado para la evaluación con otros metales pesados.
- Evaluar el carbón activado a diferentes concentraciones de las soluciones iniciales de los metales.
- Evaluar a diferentes proporciones entre el carbón activado y el agente a impregnar.
- Realizar análisis de micrografía electrónica al carbón activado para determinar la modificación en la estructura interna de los carbones después de la impregnación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, *Contaminación por Metales Pesados: Implicaciones en Salud, Ambiente y Seguridad Alimentaria*. Vol. 16 N° 2. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá – Colombia 2016. Pág. 66 – 74.
2. Página de la Organización Mundial de la Salud. *La OMS Publica Estimaciones Nacionales sobre la Exposición a la Contaminación del Aire y sus Repercusiones para la Salud*. Recuperado de:
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-estimates/es/>
3. Rodríguez R, Oldecop L, Linares R, Salvado V. *Los Grandes Desastres Medioambientales Producidos por la Actividad Minero-metalúrgica a Nivel Mundial: Causas y Consecuencias Ecológicas y Sociales*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. Pág. 17 – 18.
4. Instituto de Recursos Mundiales Ecoespaña. *Decisiones Para la Tierra. Equilibrio, Voz y Poder*. Revista del instituto de recursos mundiales. Pag 188 – 197.
5. Organización Amnistía Internacional. *Nubes de Injusticia. El Desastre de Bhopal 20 años después*. Londres 2004. Cap 1 Pág. 5 – 23.
6. Diario El Comercio. *Derrame en el golfo de México dejó graves secuelas ambientales*. Recuperado de: <http://elcomercio.pe/ciencias/planeta/derrame-golfo-mexico-dejo-graves-secuelas-ambientales-noticia-1804819>
7. Pagina. Hicks S. *O Desastre Ambiental do Love Canal- Quatro Décadas Depois*. Recuperado de: <http://www.stephenhicks.org/2015/01/04/o-desastre-ambiental-do-love-canal-quatro-decadas-depois/>
8. Pagina. Ecologistas en Acción. *El vertido del Exxon Valdez sigue Impactando 23 años después*. Recuperado de:
<http://www.ecologistasenaccion.org/article22826.html>
9. Pagina. Ministerio de Salud. *Contaminación con Metales Pesados*. Recuperado de https://www.minsa.gob.pe/portalweb/06prevencion/prevencion_2.asp?sub5=3
10. Neyra E, Llenque E.(2011) *Grado de Contaminación por Relaves Mineros en la Cuenca del Río Moche (Departamento de La Libertad)* Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo – Perú
11. Organización Mundial de La Salud. *Intoxicación con Plomo y Salud*. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>
12. Peña L, Parra S, Rodríguez C, Zuluaga A.(2008) *Guía para el Manejo del Paciente Intoxicado*. Universidad de Antioquia. Medellín – Colombia

13. Ministerio de Salud. *Guía de Práctica Clínica para el Diagnóstico y Tratamiento de la Intoxicación por Cadmio* RM N° 757 - 2013/ MINSA 2015. Recuperado de: <http://bvs.minsa.gob.pe/local/minsa/3244.pdf>
14. Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Estado Mundial del Recurso Suelo – Resumen Técnico* Roma 2016. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
15. National Geographic. (2010) *La Contaminación del Aire*. Washington. D.C – USA <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/la-contaminacion-del-aire>
16. National Geographic.(2011) *Contaminación del Agua*. Washington. D.C – USA
Recuperado de:
<http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
17. Borja M. (2013) *Estudio de Minimización de la Precipitación de Carbonatos en el Proceso de Desorción de Oro en el Carbón Activado*. (tesis de Pregrado) Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.
18. Peña K, Giraldo L, Moreno J. (2012) *Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. caracterización física y química*. Revista Colombiana de Química Vol. 41. Núm. 02. Bogotá – Colombia. pág. 311 – 323.
19. Luna D, González A, Gordonía M, Martín, N. (2007) *Obtención de Carbón Activado a partir de la Cascara de Coco*. Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco – México.
20. Martínez, A. (2012) *Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano*. Instituto de investigación del medio ambiente y la sostenibilidad – Universidad San Jorge. Zaragoza – España.
21. Paredes, A. (2011) *Estudio de la Adsorción de Compuestos Aromáticos Mediante Carbón Activado Preparado a partir de la Cascara de Castaña*. Pontificia Universidad Católica del Perú Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima – Perú.
22. Correa, A. (2011) *Producción y Caracterización de Carbón Activado Usando Vaina de Frijol: Extracción de Cd²⁺ en Solución Acuosa*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León – México.
23. Jiménez, J. (2014) *Aprovechamiento de residuos celulósicos de piña para la producción de carbón activado*. Universidad Veracruzana. Veracruz México.
24. Hernández, G. (2010) *“Aplicación de un sistema de carbón activado asistido biológicamente para la depuración de agua amargas pretratadas en un proceso de desorción”* (Tesis de maestría) Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, México.

25. Paredes, A. (2011) "*Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cascara de castaña*" (Tesis de pregrado) Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
26. Solís, J., Morales, M., Ayala, R., y Duran, M. (2012) "*Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña*". Tecnología Ciencia Educación, 27(1), 36 – 48.
27. Martínez, A. (2012) "*Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano*" (Tesis Doctoral) Universidad San Jorge, Zaragoza, España
28. Carbajal, A. (2014) "*Modificación química de carbones activados y su efecto en la adsorción de compuestos fenólicos*" (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
29. Omenat, D. (2016) "*Modificación química de carbones activados con ácidos minerales*" (Tesis Doctoral) Universidad de Extremadura, Extremadura, España.
30. Salas, B.(2016) "*Bioremediación de suelos y tratamiento de lixiviados con carbón activado de bambú del ex-basurero a cielo abierto el zapote*" (Tesis Doctoral) Instituto Politécnico Nacional, Tamaulipas, México.
31. Grisales, A., & Rojas, W. (2016) "*Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales*", Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
32. Alvarado, R, & Alvarado, A. "*Influencia de la temperatura de impregnación del azufre elemental sobre carbón activado, en la adsorción del mercurio (II)*", Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
33. Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. "*Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal*", Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14(2), 145 – 153.
34. Kirk, R., Othmer, D.,Kroschwitz, J., y Howe-Grant, M.(1994). *Encyclopedia of Chemical Technology: Fuel resources to heat stabilizers*. Volumen (15), 31 -33.
35. Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minas (2017) – OSINERMIG. *Reporte semestral de monitoreo del mercado de productos mineros segundo semestre del 2016 año 5 – n° 10 – mayo 2017*. Recuperado de :
[http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios Economicos/Reportes de Mercado/RSM-MM-II-2016.pdf](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Reportes_de_Mercado/RSM-MM-II-2016.pdf)

36. Kats, M.(2011) *Materiales y materias Primas – Minerales de Hierro*. Recuperado de <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/minerales-de-hierro.pdf>
37. Kirk, R., Othmer, D.,Kroschwitz, J., y Howe-Grant, M.(1994). *Encyclopedia of Chemical Technology: Fuel resources to heat stabilizers*. Volumen (14), 411.
38. Organización Mundial de la Salud (2017) *Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Química: Diez sustancias químicas que constituyen una preocupación para la salud pública*. Ginebra – Suiza. Recuperado de : http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/es/
39. Weinberg J. *Introducción a la contaminación por Mercurio para las ONG*. Recuperado de: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf
40. Gaona, X. (2004) *El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategia para la reducción de su liberación al medio ambiente* (tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona - España.
41. Tello, M. (2015) *Evaluación del riesgo toxicológico del plomo y cadmio en suelos del entorno del parque industrial de la ciudad de Cuenca* (tesis de Maestría). Universidad Estatal de Cuenca. Cuenca - Ecuador.
42. World Health Organization (2010). *Preventing disease through healthy environments. exposure to cadmium: A major public health concern*. Recuperado de: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/cadmium/en/
43. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016). *Resumen de Salud Pública – Talio (Thalium)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs54.html
44. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016). *Resumen de Salud Pública – Cobre (Copper)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.html
45. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016) *Resumen de Salud Pública – Zinc (Zinc)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html
46. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016). *Resumen de Salud Pública – Cromo (Chromium)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html
47. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016) *Resumen de Salud Pública – Berilio (Beryllium)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs4.html

48. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016) *Resumen de Salud Pública – Aluminio (Aluminum)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts22.html
49. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016). *Resumen de Salud Pública – Arsénico (Arsenic)*. Atlanta, USA.: ATSDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts2.html
50. Gobierno de España – Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación – Ministerio para la transición ecológica (2016). *Metales Pesados*. Madrid, España.: Recuperado de: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx
51. Organización Mundial de la Salud (2018). *Intoxicación por Plomo y Salud*. Ginebra – Suiza. Organización Mundial de la Salud. Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>
52. Wolpaw J.(2007) *Environmental Policy as Social Policy? The Impact of Childhood Lead Exposure on Crime*. National Bureau of Economic Research – Massachusetts, USA. Recuperado de: <http://www.nber.org/papers/w13097.pdf>
53. PNUMA (18 de octubre 2013). *UN health agency urges Governments to end production, use of lead paint*. UN New Disponible en: <https://news.un.org/en/story/2013/10/453272-un-health-agency-urges-governments-end-production-use-lead-paint#.VZKuAflViko>
54. Nordberg, G. (2000) *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Capítulo 63 Metales: Propiedades Químicas y Toxicidad*. Tomo (2) 21 -23 Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>
55. Galán E. Romero A. (2008) *Conferencia Contaminación de Suelos por Metales Pesados*. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química Universidad de Sevilla. España.
56. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016) *Resumen de Salud Pública – Cadmio (Cadmium)*. Atlanta, USA. ASTDR en español. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html
57. Organización Mundial de la Salud (2017). *Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas: Cadmio*. Ginebra – Suiza. Recuperado de: http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/cadmium/es/
58. Organización Mundial de la Salud *Guidelines for drinking-water quality - 4th ed* [Versión electrónica]. Ginebra – Suiza 2011.

http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf;jsessionid=42178072DC3F11C594C9A1FAED0AC10E?sequence=1

59. Agencia de Protección Ambiental. (2016) *Calidad del Aire Fronterizo – Acerca de los contaminantes Peligrosos del Aire del Air Quality System, AQS, Sistema de Calidad del Aire*. New York, USA Recuperado de: https://www3.epa.gov/ttn/catc/cica/help/haqshaps_s.html
60. Kats, M. (2011) *Materiales y Materias Primas – Azufre*. Buenos aires – Argentina.
61. Grisales A. Rojas W. (2016) *Obtención de Carbón Activado a partir de Activación Química de Pulpa de Café y su Aplicación en la Remoción de Colorantes en Aguas Residuales Industriales*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.
62. Alvarez M. Carrasco F. Maldonado F. (2014) *Desarrollo y Aplicaciones de Materiales Avanzados de Carbón* Universidad Internacional de Andalucía. Sevilla.
63. British Petroleum. *BP Statistical Review of World Energy June 2017*. Londres 2017. Pág. 38 – 39.
64. Luna D, González A, Gordon M, Martin N. (2007). *Obtención de Carbón Activado a partir de la Cascara de Coco*. Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco – México.
65. Martínez A. *Desarrollo de Carbones Activados a partir de residuos Lignocelulosicos para la Adsorción y Recuperación de Tolueno y n- Hexano*. Instituto de Investigación del Medio Ambiente y la Sostenibilidad – Universidad San Jorge – Villanueva de Gallegos 2012. Pág. 4
66. Prados G. *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Antibióticos -Nitroimidazoles- Mediante Adsorción sobre Carbón Activado y Tecnologías Avanzadas de Oxidación* Universidad de Granada – Granada 2010. Pag. 52.
67. Máster en Ingeniería del Agua. *Manual del Carbón Activado*. Universidad de Sevilla. España. Pág. 8
68. García, V. Machado, R. (2011) *Diseño preliminar de una planta para la obtención de carbón activado*. (tesis de Pregrado) Universidad de Oriente. Cumaná – Venezuela.
69. Romero M. *Efecto de la composición de los gases de combustión en la captura de CO2 por nanotubos de carbono: Un estudio de simulación*. Universidad de Sevilla. España 2012. Pag 7 – 8.
70. Lazo J. Navarro A. Sou-Kou M. Llanos B. *Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol*. Revista Sociedad Quimica del Peru. Vol 74 N° 3 2008. Pag 3-19.

71. Diario Correo. (2017) *Perú se posicionó como el segundo proveedor mundial de palta en 2017*. Recuperado de:

<https://diariocorreo.pe/economia/peru-se-posiciono-como-el-segundo-proveedor-mundial-de-palta-en-2017-806242/>

Biblioteca de Ingeniería Química

VIII. ANEXOS.

Recta de calibración de azul de metileno.

- a) Peso de azul de metileno teórico para 100 ppm

$$\frac{100 \text{ mgAM}}{L} * 1L * \frac{1 \text{ gAM}}{10^3 \text{ mgAM}}$$

Simplificando

$$W = 0.1 \text{ g AM}$$

- b) Concentración real de azul de metileno.

$$W_{real \text{ AM}} = 0.1057 \text{ gAM}$$

$$\text{ppm AM} = \frac{0.1057 \text{ gAM}}{0.1L} * \frac{10^3 \text{ mgAM}}{1 \text{ gAM}}$$

$$\text{ppm AM} = 1057 \frac{\text{mgAM}}{L}$$

- c) Determinación de los volúmenes teóricos a tomar.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (8)$$

Donde:

 C_1 = concentración de AM inicial. V_1 = volumen de AM a tomar de la muestra inicial. C_2 = concentración que se desea obtener de AM. V_2 = volumen de AM que se desea preparación en disolución.**Tabla 22.** Volúmenes teóricos para la recta de calibración.

Std	ppm A.M. (final)	Vol final	ppm A.M. Sol Trabajo	Vol a tomar (mL)
1	0	50	1057.0000	0.000
2	0.5	50	1057.0000	0.024
3	1	50	1057.0000	0.047
4	2	50	1057.0000	0.095
5	6	50	1057.0000	0.284
6	12	50	1057.0000	0.568

Teniendo en cuenta el volumen a tomar de la solución de trabajo preparada se ajustarán los volúmenes reales para tener una mejor exactitud y por ende menos error en el cálculo de trabajo

Tabla 23. Datos de concentración reales de azul de metileno.

Std	μL real tomados	Aforar a	ppm A.M. Sol. Trabajo	ppm REAL
1	0	50	1057.00	0.000
2	25	50	1057.00	0.529
3	50	50	1057.00	1.057
4	100	50	1057.00	2.114
5	300	50	1057.00	6.342
6	600	50	1057.00	12.684

Cuadro de resultados de lecturas de azul de metileno en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 665.

Tabla 24. Datos de concentración de AM (ppm) con absorbancia

Replica 1		replica 2		Promedio
ppm Reales	Abs	ppm Real	Abs	Abs
0	0	0	0	0
0.529	0.148	0.529	0.124	0.136
1.057	0.254	1.057	0.249	0.2515
2.114	0.493	2.114	0.488	0.4905
6.342	1.37	6.342	1.356	1.363

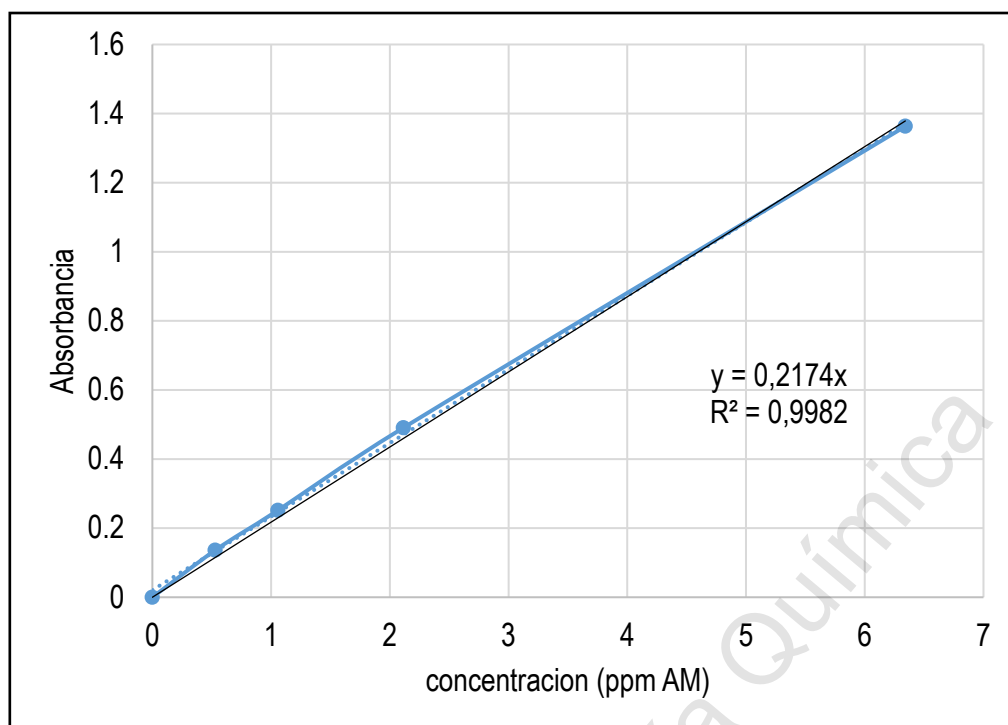


Figura 6. Absorbancia en función de la concentración de AM

Para calcular la exactitud de la recta de calibración se tomó 40 μ L de la solución inicial y se aforo a 50 ml, la cual contaba con una concentración de 0.846 ppm; luego fue llevada a una lectura en el espectrofotómetro un valor de 0.188, usando la ecuación de la recta calculamos la concentración.

$$Y = 0.1935X + 0.0501$$

$$0.188 = 0.1935X + 0.0501$$

$$X = 0.7127$$

Con los valores obtenidos y generando la curva de calibración, la cual se usará para determinar los valores de las concentraciones reales para cada una de nuestras muestras de carbón activado.

Etapas de carbonización – Rendimiento.

Se carbonizo diferentes masas de pepa de palta a las diferentes temperaturas (de 300°C a 500°C) y con ello se determinó la reducción en masa tomando los pesos iniciales y finales en cada muestra.

En la tabla siguientes vemos los pesos iniciales y finales en cada prueba.

Para determinar el rendimiento se empleó la siguiente formula

$$\text{Rendimiento} = \frac{m}{m_o} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

m= masa del carbón activado (g)

m_o= masa del precursor (g)

Tabla 25. Datos de la primera carbonización.

Temperatura (°C)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento	% de Reducción
300	24.01	6.62	27.57%	72.43%
350	24.07	6.50	27.00%	73.00%
400	24.03	5.75	23.93%	76.07%
450	24.09	5.13	21.30%	78.70%
500	24.04	4.44	18.47%	81.53%

En la primera prueba de tomo como peso aproximado de 24 gramos, este peso se repitió en todo el proceso.

Tabla 26. Datos en la segunda carbonización.

Temperatura (°C)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento	% de Reducción
300	35.02	11.41	32.58%	67.42%
350	35.10	10.20	29.06%	70.94%
400	35.14	9.25	26.32%	73.68%
450	35.09	8.83	25.16%	74.84%
500	35.01	7.50	21.42%	78.58%

En la segunda prueba de tomo como peso aproximado de 35 gramos, este peso se repitió en todo el proceso.

Tabla 27. Datos en la tercera carbonización.

Temperatura (°C)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento	% de Reducción
300	42.57	15.93	37.42%	62.58%
350	42.51	15.73	37.00%	63.00%
400	42.50	13.78	32.42%	67.58%
450	42.55	12.37	29.07%	70.93%
500	42.67	11.54	27.04%	72.96%

En la tercera prueba de tomo como peso aproximado de 42.50 gramos, este peso se repitió en todo el proceso.

Determinación de la humedad en la materia prima.

Para la determinación de la humedad en la materia prima se empleó una balanza determinadora de humedad marca Ohaus.

En primer lugar, se configuro la balanza determinadora de humedad en los parámetros necesarios (temperatura, tiempo de variación de peso)

Se colocó una muestra de pepa de palta (*Persea americana*) finamente cortadas para tener un resultado más exacto; la masa de muestra colocada fue de 0.955 g y posterior a ello se puso en operación el equipo.

Tabla 28. Valores en la determinación de humedad en la muestra

N°	Parámetro	Valor
1	Masa inicial	0.645 g
2	Tiempo de operación	09.55 min
3	Masa final	0.382
4	% de humedad	40.78
5	Solidos (%)	59.22
6	Temperatura de operación °C	110

Soluciones de AM en la etapa de carbonización.

Preparación de la solución de azul de metileno para la determinación del mejor carbón activado.

- ✓ Se partió de la necesidad de preparar una solución de 100 ppm de AM.

Peso de azul de metileno teórico para 100 ppm

$$\frac{100 \text{ mgAM}}{L} * 1L * \frac{1 \text{ gAM}}{10^3 \text{ mgAM}}$$

Simplificando

$$W = 0.1 \text{ g AM}$$

- ✓ Concentración real de azul de metileno.

Se preparó en tres ocasiones soluciones de azul de metileno para los carbones.

Para los carbones de 300°C y 350 °C

$$W_{real \text{ AM}} = 0.1006 \text{ gAM}$$

$$ppm \text{ AM} = \frac{0.1006 \text{ gAM}}{1 \text{ L}} * \frac{10^3 \text{ mgAM}}{1 \text{ gAM}}$$

$$ppm \text{ AM} = 100.6 \frac{\text{mgAM}}{L}$$

Para el carbón de 400°C.

$$W_{real \text{ AM}} = 0.0253 \text{ gAM}$$

$$ppm \text{ AM} = \frac{0.0253 \text{ gAM}}{0.25 \text{ L}} * \frac{10^3 \text{ mgAM}}{1 \text{ gAM}}$$

$$ppm \text{ AM} = 101.2 \frac{\text{mgAM}}{L}$$

Para los carbones de 450°C y 500°C

$$W_{real \text{ AM}} = 0.1009 \text{ gAM}$$

$$ppm\ AM = \frac{0.1009\ gAM}{1\ L} * \frac{10^3\ mgAM}{1\ gAM}$$

$$ppm\ AM = 100.9\ \frac{mgAM}{L}$$

- A) Preparación de la solución de Plomo partiendo de la concentración de 100 ppm de Pb^{2+} , se partió de una sal de nitrato de plomo - $Pb(NO_3)_2$

$$\frac{100\ mg\ Pb^{2+}}{L} * 1L * \frac{331.2\ g\ Pb(NO_3)_2}{207.2\ g\ Pb^{2+}} \frac{1\ g\ Pb^{2+}}{10^3\ mg\ Pb^{2+}}$$

Simplificando

$$W = 0.1598\ g\ de\ Pb(NO_3)_2\ \quad (Peso\ teorico)$$

Cálculo de la concentración real para un $W=0.1596\ g$ de $Pb(NO_3)_2$

$$ppm\ Pb^{2+} = \frac{0.1596\ g\ Pb(NO_3)_2}{1\ L} * \frac{10^3\ mg\ Pb^{2+}}{1\ g\ Pb^{2+}} * \frac{207.2\ g\ Pb^{2+}}{331.2\ g\ Pb(NO_3)_2}$$

$$ppm\ Pb^{2+} = \frac{99.85\ mg\ Pb^{2+}}{L}$$

- B) Preparación de la solución de Hierro partiendo de la concentración de 100 ppm de Fe^{2+} , a base del Sulfato ferroso heptahidratado - $FeSO_4 \cdot 7H_2O$.

$$\frac{100\ mg\ Fe^{2+}}{L} * 1L * \frac{278.2\ g\ FeSO_4 \cdot 7H_2O}{55.85\ g\ Fe^{2+}} \frac{1\ g\ Fe^{2+}}{10^3\ mg\ Fe^{2+}}$$

Simplificando

$$W = 0.4981\ g\ de\ FeSO_4 \cdot 7H_2O\ \quad (Peso\ teorico)$$

Cálculo de la concentración real para un $W=0.4979\ g$ de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$.

$$ppm Fe^{2+} = \frac{0.4979g \text{ de } FeSO_4 \cdot 7H_2O}{1 L} * \frac{10^3 mg Fe^{2+}}{1g Fe^{2+}} * \frac{55.85 g Fe^{2+}}{278.2 g FeSO_4 \cdot 7H_2O}$$

$$ppm Fe^{2+} = \frac{99.96 mg Fe^{2+}}{L}$$

C) Preparación de la solución de Cadmio partiendo de la concentración de 100 ppm de Cd^{2+} , a base del Nitrato de Cadmio tetrahidratado - $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$

$$\frac{100 mg Pb^{2+}}{L} * 1L * \frac{308.42 g Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O}{112.41 g Cd^{2+}} * \frac{1g Cd^{2+}}{10^3 mg Cd^{2+}}$$

Simplificando

$$W = 0.2745 g Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O \quad (\text{Peso teorico})$$

Cálculo de la concentración real para un $W=0.2745 g$ de $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$

$$ppm Cd^{2+} = \frac{0.2745 g Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O}{1 L} * \frac{10^3 mg Cd^{2+}}{1g Cd^{2+}} * \frac{112.41 g Cd^{2+}}{308.42 g Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O}$$

$$ppm Cd^{2+} = \frac{100.05 mg Cd^{2+}}{L}$$

Modelo cinético de adsorción.

➤ **Modelo de pseudo primer orden.**

La ecuación de Lagergren es la más ampliamente aplicada, esta fue la primera ecuación de velocidad para la sorción de los sistemas líquido-sólido basado en la capacidad sólido. Este modelo se define mediante la siguiente ecuación:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} * t$$

Dónde:

q_t : cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente al tiempo, (mg/g).

k_1 : constante de velocidad de pseudo primer orden, (s^{-1}).

Tabla 29. Cálculo del modelo de Pseudo primer orden

Tiempo (min)	ppm Pb^{2+}	Masa de carbon (g)	ppm adsorbidos	Q_t	$\text{Log}(Q_e - Q_t)$
0	86,75	0	0,00	0	1,2086
30	35,60	0,5040	51,15	10,23	0,7735
60	28,00	0,5040	58,75	11,75	0,6450
90	20,00	0,5056	66,75	13,35	0,4496
120	16,24	0,5060	70,51	14,102	0,3147
360	8,80	0,5066	77,95	15,59	-0,2396
720	8,46	0,5037	78,29	15,658	-0,2941
1440	5,92	0,5025	80,83	16,166	-

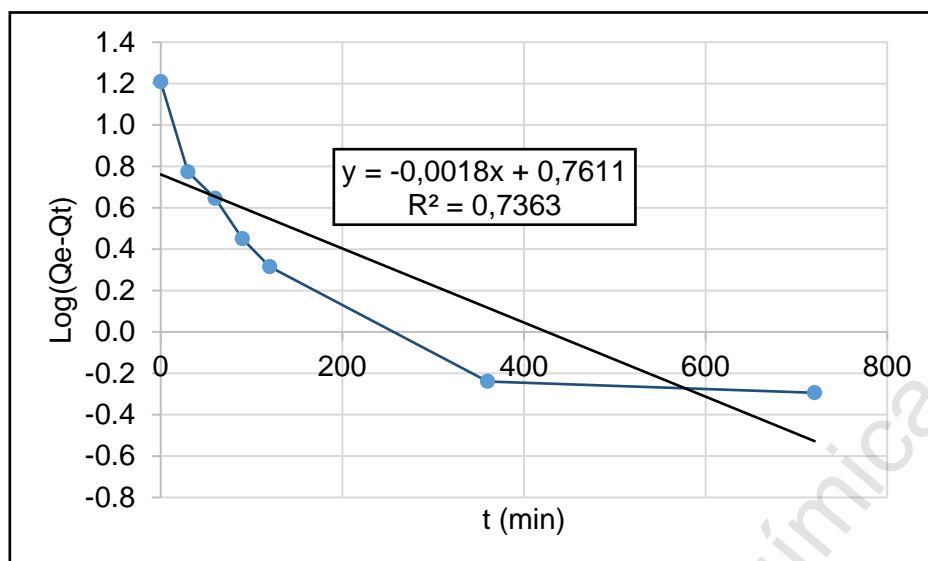


Figura 19. Tiempo de agitación Vs Log(Qe-Qt)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} * t$$

$$y = -0.0018x + 0.7611$$

calculo de la concentración en el equilibrio

$$\log q_e = 0.7611$$

$$q_e = 5.7690 \text{ mg/g}$$

Calculo de la constante de equilibrio

$$-\frac{k_1}{2.303} = -0.0018$$

$$k_1 = 0.0041 \text{ s}^{-1}$$

➤ Modelo de pseudo segundo orden.

Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay y dado a conocer en 1999. En el modelo de pseudo segundo orden la ecuación cinética está representada por:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2(q_e)^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (8)$$

Donde:

K_2 : constante de velocidad de pseudo segundo orden, ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tabla 30. Cálculo del modelo cinético de Pseudo segundo orden.

Tiempo(min)	ppm Pb^{2+}	Masa de carbón (g)	ppm adsorbidos	Q_t	t/Q_t
0	86,75	0	0,00	0	0
30	35,60	0,5040	51,15	10,23	2,9326
60	28,00	0,5040	58,75	11,75	5,1064
90	20,00	0,5056	66,75	13,35	6,7416
120	16,24	0,5060	70,51	14,102	8,5094
360	8,80	0,5066	77,95	15,59	23,0917
720	8,46	0,5037	78,29	15,658	45,9829
1440	5,92	0,5025	80,83	16,166	89,0758

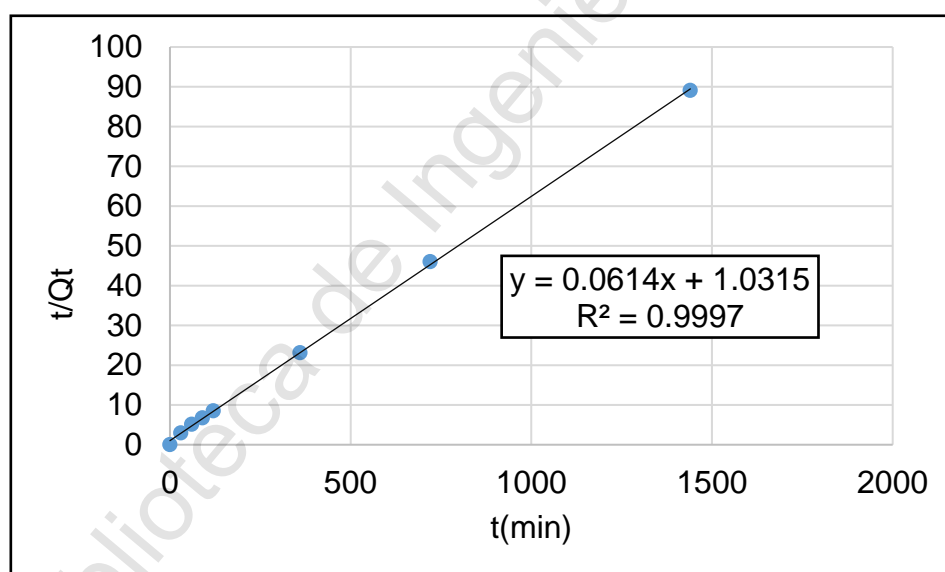


Figura 20. Tiempo de agitación vs t/Q_t

Calculo de la concentración de equilibrio

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2(q_e)^2} + \frac{1}{q_e} t$$

$$y = 0,0614x + 1,0315$$

$$\frac{1}{q_e} = 0.0614$$

$$q_e = 16.2866 \text{ mg/g}$$

Calculo de la constante de velocidad

$$1.0315 = \frac{1}{k_2(q_e)^2}$$

$$k_2 = \frac{1}{1.0315 (16.2866)^2}$$

$$k_2 = 0.0037 \text{ g. mg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Por los anterior calculado se puede concluir que el comportamiento del carbón activado a base de pepa de palta sigue el modelo cinético de Pseudo segundo orden con un valor para la constante de velocidad de $0.0037 \text{ g. mg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

FOTOGRAFÍAS

Figura 21. Determinado la conductividad en la muestra.



Figura 22. Muestras en estufa para el secado.



Figura 23. Muestras listas para la carbonización.



Figura 24. Determinación de la humedad en la materia prima.



Figura 25. Resultados en la determinación de humedad

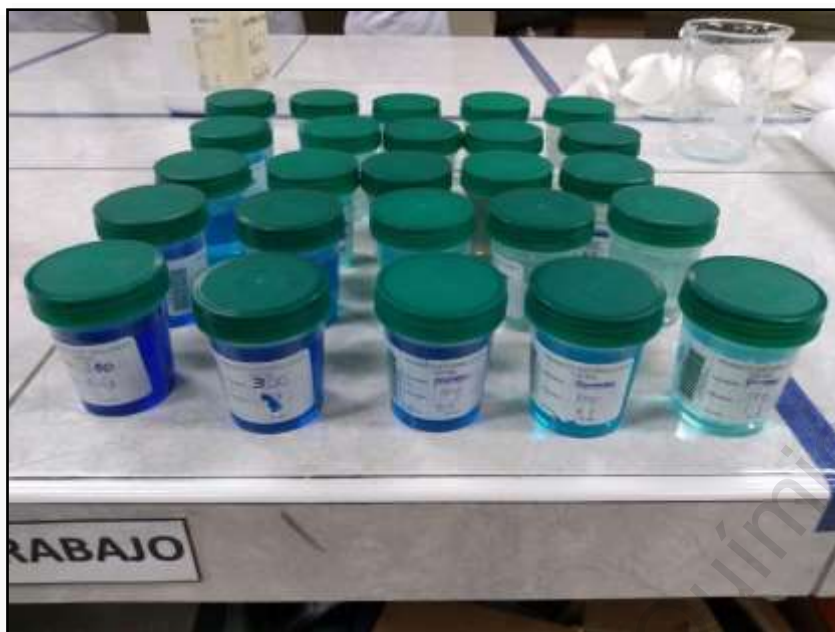


Figura 26. Muestras de azul de metileno filtradas



Figura 27. Muestras de metales en agitación

GLOSARIO.

CA	Carbón activado.
AM,	Azul de metileno.
BCC,	Estructura cúbica centrada en el cuerpo.
TDAH,	Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad.
IARC,	Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer.
q,	Capacidad de adsorción del adsorbente.
Ce,	Concentración de equilibrio del adsorbato en la solución después de la adsorción.
DQO,	Demanda química de oxígeno.
ppm,	Partes por millón.
C1,	Concentración de AM inicial.
C2,	Concentración que se desea obtener de AM.
V1,	Volumen de AM a tomar de la muestra inicial.
V2,	Volumen de AM que se desea preparación en disolución.
M,	Masa del carbón activado (g).
m _o	Masa del precursor (g).